

การพัฒนาปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับพื้นที่ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง

นายธิติวุฒิ ตะวงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF SELF-LEVELING UNDERLAYMENTS

Mr Thitiwut Tawong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับปูพื้นที่ปรับระดับได้
ด้วยตัวเอง

โดย

นายธิดิวิมล ตระวงษ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัดน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี เจียมศิริเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัดน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี เจียมศิริเลิศ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.วิทยา พันธุ์พา)

วิทยุฒิ ตะวงษ์ : การพัฒนาปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับปูพื้นที่ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง (DEVELOPMENT OF SELF-LEVELING UNDERLAYMENTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ, 73 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง (SLUs) เช่น ความสามารถในการใช้งาน พฤติกรรมการไหลตัว การหดตัวและความสามารถในการรับแรงอัด โดยสูตรส่วนผสมได้เตรียมให้อยู่ในระบบของ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์-แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์และแคลเซียมซัลเฟต (OPC-CAC-CS) เป็นหลัก โดยได้ทำการหาสูตร SLUs ที่มีความเหมาะสม ที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในส่วนผสมช่วงระหว่างร้อยละ 36-42 โดยน้ำหนัก แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในช่วงระหว่างร้อยละ 6-12 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมซัลเฟตได้กำหนดปริมาณไว้ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก สูตรส่วนผสมที่ได้จะเกิดเฟสของ Ettingite ซึ่งเป็นเฟสสำคัญ ที่เกี่ยวข้องกับการหดตัว/ขยายตัวและสมบัติหลังผสมเสร็จใหม่ของ SLUs และได้ใช้วิธีของ Taguchi (การสุ่มตัวอย่างเรียงแถวแบบฉาก) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง มีการขยายตัวประมาณ 1% และพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ Shear thickening (Dilatant) ซึ่งจะมีค่า Yield stress ต่ำ และความแข็งแรงอัดมีค่ามากกว่า 40 MPa ที่อายุการบ่ม 28 วัน ทำการวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างจุลภาคของแรงค์ประกอบของ SLUs ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาควิชาวัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5172316723 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: SELF-LEVELING / SLUs

THITIWUT TAWONG : DEVELOPMENT OF SELF-LEVELING UNDERLAYMENTS.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SUPATRA JINAWATH, Ph.D.,

THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF.SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., 73 pp.

Properties of self-leveling underlayments (SLUs) such as workability, rheology, drying shrinkage and compressive strength were studied. The formulations were prepared in OPC-CAC-C\$ system with OPC contents in the range of 36-42 wt%, CAC contents in the range of 6-12 wt.% and C\$ content fixed at 6 wt%. The mixes belong to the region of ettringite phase, the major modification of drying shrinkage/expansion and fresh property of SLUs. The experimental design of the mixes was optimized by Taguchi's method (orthogonal array). The results showed that the SLUs in OPC-CAC-C\$ base had an average linear expansion of about 1%. The rheological behavior was shear thickening (dilatant) with very low yield stress, and compressive strength was over 40 MPa at 28 days. Mineral phases and microstructures of the prepared SLUs were investigated by X-ray diffraction and scanning electron microscopy, respectively.

Department: Materials Science..... Student's Signature.....

Field of Study: Ceramic Technology..... Advisor's Signature.....

Academic Year: 2010..... Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.สุพัทธา จินาวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคคลและสถาบันต่างๆ ดังมีรายนามต่อไปนี้

ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

ดร.วิทยา พันธุ์พา ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในในการใช้งานเครื่องมือและการวิเคราะห์ผลการทดสอบและคณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาวิชาการและความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials) ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริษัท แม็กซ์ อินโนเวชัน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย วัสดุดิบและสารเคมีด้วยดีตลอดงานวิจัย

บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุดิบในงานวิจัย

เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ (CAC)	4
2.2.1 เฟสของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์.....	4
2.2.1.1 แคลเซียมโมโนอะลูมิเนต (CA).....	4
2.2.1.2 แคลเซียมไดอะลูมิเนต(CA ₂ , Grossite)	5
2.2.1.3 Dodecacalcium Hepta - Aluminate (C ₁₂ A ₇ , Mayenite)	6
2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)	6
2.3.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.3.1.1 ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)..	6
2.3.1.2 ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement). 6	
2.3.1.3 ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งตัวเร็วหรือให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement).....	7
2.3.1.4 ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่มีอัตราการคายความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement).....	7
2.3.1.5 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต้านทานซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistant Portland Cement).....	7
2.3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.3.2.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO ₂ , C ₃ S)	7

2.3.2.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2, \text{C}_2\text{S}$).....	8
2.3.2.3 ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3, \text{C}_3\text{A}$).....	8
2.3.2.4 เทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{C}_4\text{AF}$)	9
2.3.2.5 ยิปซัม ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	9
2.3.2.6 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	9
2.3.2.7 แอลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O และ K_2O).....	9
2.3.3 ปฏิกริยาในปูนซีเมนต์	10
2.3.3.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S	10
2.3.3.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ C_3A	11
2.3.3.3 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ C_4AF	12
2.3.3.4 ปฏิกริยาของ Ettringite.....	12
2.3.4 ผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน	13
2.3.4.1 ผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S	13
2.4 แอนไฮไดรท์ (Calcium Sulfate).....	16
2.5 หินปูน (Limestone).....	16
2.6 ททราย (Sand).....	16
2.7 น้ำ (Water)	16
2.8 สารปรับการไหลตัว (Super plasticizer)	16
2.9 สารเร่งปฏิกริยา (Accelerator)	17
2.10 สารหน่วงปฏิกริยา (Retarder).....	17
2.11 สารช่วยให้ปฏิกริยาคงตัว (Stabilizer).....	17
2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	20
3.1.1 วัตถุประสงค์	20
3.1.2 สารเคมี.....	20
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	20
3.3 วิธีการทดลอง	21
3.3.1 การวิเคราะห์วัตถุประสงค์	21
3.3.2 การออกแบบการทดลอง	23

3.3.3	แผนผังการทดลอง	24
3.3.4	การเตรียมตัวอย่าง.....	25
3.3.4.1	ขั้นตอนการผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	25
3.4	การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	26
3.4.1	การทดสอบการไหลตัวของปูนซีเมนต์ผสมเสร็จใหม่ (Fresh mortar properties)..	26
3.4.2	การทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	28
3.4.3	พฤติกรรมกรไหลตัว (Rheological behavior, using neat cement paste)	29
3.4.4	การหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์ (Drying shrinkage).....	30
3.4.5	การทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (ASTM C1585-04)	31
3.4.6	การทดสอบความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (ASTM C 109/C).....	32
3.4.7	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของปูนมอร์ตาร์	33
3.4.8	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscopy, SEM)	34
บทที่ 4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	35
4.1	ผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่	35
4.2	ผลการทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์.....	37
4.3	ผลการทดสอบพฤติกรรมกรไหลตัว.....	37
4.4	ผลการทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์.....	42
4.5	ผลการทดสอบการหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	45
4.6	ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์	47
4.7	ผลการตรวจสอบเฟสของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วย XRD	48
4.8	ผลการตรวจสอบปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วย SEM	49
4.8.1	ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร A2	49
4.8.2	ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร B1	51
4.8.3	ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร C2	53
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2	ข้อเสนอแนะ	56
	รายการอ้างอิง.....	57
	ภาคผนวก.....	59
	ภาคผนวก ก	60

ภาคผนวก ข	61
ภาคผนวก ค	63
ภาคผนวก ง	64
ภาคผนวก จ	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	10
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์โดยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)	15
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของสารปรับการไหลตัว.....	18
ตารางที่ 3.1 Taguchi method (L9 orthogonal array, 3 parameters).....	23
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมในการเตรียมผสมปูนในระบบ OPC-CAC-C\$ System	26
ตารางที่ 4.1 L9 orthogonal array, 3 parameters (The larger compressive strength, is the better)	35
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่.....	35
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์	37
ตารางที่ 4.4 สมบัติการไหลของสูตร A2 ที่วัดได้จากเครื่อง Brookfield.....	39
ตารางที่ 4.5 สมบัติการไหลของสูตร B1 ที่วัดได้จากเครื่อง Brookfield.....	40
ตารางที่ 4.6 สมบัติการไหลของสูตร C2 ที่วัดได้จากเครื่อง brookfield.....	41
ตารางที่ 4.7 ความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ 7 วัน	43
ตารางที่ 4.8 ความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ 28 วัน	43
ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A หลัง 1 วัน,2 วันและ 3 วัน.....	45
ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B หลัง 1 วัน,2 วันและ 3 วัน.....	45
ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C หลัง 1 วัน,2 วันและ 3 วัน.....	45

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมโมโนอะลูมิเนต(CA).....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมไดอะลูมิเนต(CA ₂ , Grossite).....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของDodecacalcium Hepta - Aluminate (C ₁₂ A ₇ , Mayenite)	6
รูปที่ 2.4 รูปร่างลักษณะของ C ₃ S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C ₂ S เป็นเม็ดกลมสีดำ.....	8
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (a) ปฏิกิริยาเริ่มต้น, (b) หลัง 10 นาที, (c) หลัง 10 ชั่วโมง, (d) หลัง 18 ชั่วโมง, (e) 1-3 วัน, และ (f) หลัง 2 สัปดาห์.....	14
รูปที่ 2.6 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15
รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของ Polycarboxylate	17
รูปที่ 3.1 กราฟ XRD แสดงผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงแร่ของแอนไฮไดรท์	21
รูปที่ 3.2 กราฟ XRD แสดงผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเชิงแร่ของ Limestone.....	22
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลอง	24
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว slump test.....	27
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว V-funnel.....	27
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูน (Vicat apparatus)	28
รูปที่ 3.7 จุดที่วัดขนาดหาการหดตัว	31
รูปที่ 3.8 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ	32
รูปที่ 3.9 เครื่อง Compressive strength รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท INSTRON.....	33
รูปที่ 3.10 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker	33
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope,SEM)	34
รูปที่ 4.1 การทดสอบ spread test และจุดวัดความกว้าง	36
รูปที่ 4.2 (a) การแยกตัวระหว่างซีเมนต์และวัสดุเติมแต่งของสูตร C3, (b) การเกิดฟองอากาศ อย่างรุนแรงที่ผิวหน้าขณะหล่อโมล.....	36
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และค่า shear rate ของสูตร A2	39
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และค่า shear rate ของสูตร B1	40
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และค่า shear rate ของสูตร C2	41
รูปที่ 4.6 รูปขณะทดสอบความแข็งแรง (Compressive strength)	42
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงสูตร A ระหว่างการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน	44
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงสูตร B ระหว่างการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน	44

รูปที่ 4.9	กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงสูตร C ระหว่างการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน.....	44
รูปที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Water Absorption(I) กับ Square root of Time, วัดค่าในช่วงระหว่าง 1 นาทีถึง 6 ชั่วโมง (Initial rate).....	47
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Water Absorption(I) กับ Square root of Time, วัดค่าในช่วงระหว่าง 1 วันถึง 7 วัน (Secondary rate)	48
รูปที่ 4.12	เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน.....	48
รูปที่ 4.13	เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน.....	49
รูปที่ 4.14	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ	50
รูปที่ 4.15	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ	51
รูปที่ 4.16	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ	52
รูปที่ 4.17	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ	52
รูปที่ 4.18	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ	53
รูปที่ 4.19	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

Self-leveling underlayments (SLUs) คือปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สำหรับปรับระดับพื้นให้ได้ระนาบเรียบเสมอกัน เพื่อใช้ในการเทพปรับระดับพื้นผิวเดิมที่ผิวเสียหาย เช่น พื้นกระเบื้อง พื้นไม้ อัด หรือพื้นคอนกรีตที่ผิวหน้าขรุขระไม่ได้ระดับ ในสมัยก่อนนั้นการเทพปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อปิดพื้นผิวที่ไม่ระนาบหรือไม่เรียบ จะทำโดยการเกลี่ยด้วยเกรียงหรือคราดด้วยไม้เนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ไหลตัวไม่ดี การปรับให้ได้ระนาบทำได้ยาก ซึ่ง SLUs นี้จะไหลตัวได้ดีตามแรงโน้มถ่วงของโลก จึงไหลไปเติมเต็มในซอกมุมต่างๆ และสามารถปรับระดับได้ด้วยตัวเอง ทำให้การตกแต่งที่ตามมา เช่นการปูกระเบื้องชนิดต่างๆ ทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ใช้ปรับปรุงพื้นผิวเดิมที่เสียหายแล้ว ยังสามารถนำไปเทพพื้นสำหรับ ลานจอดรถ พื้นโรงงาน พื้นคลังเก็บสินค้า พื้นสนามกีฬา และอื่นๆ ดังนั้น SLUs ที่ดีจะต้องสามารถปรับระดับผิวหน้าได้ด้วยตัวของมันเอง มีเวลาในการเซ็ตตัวที่เหมาะสม และมีความแข็งแรงอย่างรวดเร็วสามารถรับแรงกดได้เร็วที่สุด มีความทนทาน มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยและมีความพูนตัว⁽¹⁾

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบไปด้วยสารประกอบหลัก คือ ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียม ซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์ (C_4AF) เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำจะเกิดสารประกอบใหม่คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) สารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีทั้งที่เป็นผลึกและอสัณฐานที่มีขนาดเล็กมากและมีส่วนช่วยให้เกิดความแข็งแรงในปูนซีเมนต์แตกต่างกันไป ซึ่งส่วนผลสมหลักของ SLUs นั้นจะประกอบไปด้วยซีเมนต์ หินปูน ททรายและส่วนผลสมอื่นๆ SLUs ที่นิยมใช้กันจะมี 2 แบบ คือ OPC (Ordinary portland cement or Type I) และ C\$ ($CaSO_4$) based⁽¹⁾

ซึ่ง SLUs ทั้ง 2 แบบที่ใช้กันอยู่นั้นจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น OPC based (CSH) จะมีสมบัติต้านทานการละลายน้ำได้ดี มีความแข็งแรงสูง และใช้เวลาบ่มน้อยกว่า ส่วน C\$ based ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) จะมีสมบัติที่ดีในเรื่องของเวลาการเซ็ตตัวที่เร็วกว่า ทำให้ใช้งานได้เร็ว โอกาสที่จะมีรอยร้าวน้อย สามารถปูได้โดยไม่มีรอยต่อ ทำให้การเทพเป็นไปอย่างต่อเนื่อง แต่พบว่าทั้ง OPC based และ C\$ based ต่างก็ยังมีข้อเสียคือ OPC based จะเกิดฟองอากาศมากขณะทำการผสม ฟองอากาศนี้จะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา hydration และยังทำให้เกิดความพูนตัว เป็นผลให้ความแข็งแรงของ SLUs ลดลง⁽²⁾ ส่วน C\$ based จะมีการดูดซึมน้ำทำให้ SLUs เกิดการละลายน้ำและความแข็งแรงลดลง จึงมีรายงานวิจัยนำเอา CAC (Calcium aluminate cement) มาผสม

เพื่อปรับปรุงสมบัติของ OPC based SLUs โดยปรับเป็นระบบ CAH-CSH-Ettringite (calcium aluminate hydrate-calcium silicate hydrate and ettringite system) เพื่อให้มีการเซ็ตตัวเร็วขึ้น ให้ความแข็งแรงเริ่มต้นสูงและลดการหดตัว⁽¹⁾

โดยปกติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มีการไหลตัวแบบ Shear thickening แต่ในส่วนของ SLUs นั้น นอกจากจะต้องการในเรื่องความแข็งแรง เพื่อให้มีความทนทานในการใช้งานแล้ว ความสามารถในการไหลตัวก็เป็นสมบัติสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องมี ซึ่งการไหลตัวนั้นได้มาจากการทำให้ปูนซีเมนต์มีการไหลตัวคล้ายของเหลว ด้วยการเติมสารพอลิเมอร์ลงไป ซึ่งเรียกว่าสารปรับการไหลตัว (superplasticizer) โดยการทำงานของสารปรับการไหลตัวก็คือ จะทำละลายกับน้ำแล้วเข้าไปดูดซับที่ผิวของผงซีเมนต์ ซึ่งจะไปห่อหุ้มส่วนผสมอื่นๆ โดยเฉพาะส่วนผสมที่มีเหลี่ยมมุม เช่น หินปูนและทราย ลดการเสียดทานทำให้การไหลตัวของมอร์ตาร์เป็นไปได้ง่าย ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เป็นผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สารช่วยปรับการไหลตัวทางการค้าที่มีการนำมาใช้โดยทั่วไปมีหลายชนิด เช่น melflux, melment, sodium naphthalene และอื่นๆ ซึ่งช่วยให้เกิดการไหลตัวของมอร์ตาร์ หลังจากเติมเข้าไปแล้วปูนซีเมนต์สำหรับปรับระดับพื้นควรมีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบ Shear thickening (Dilatant) ที่มี Yield stress น้อยมาก คือเมื่อทำการเทออกไปแล้วปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จะไหลตัวได้ทันที และยังคงสามารถไหลตัวได้อีกระยะหนึ่งเพื่อปรับระดับผิวหน้าและเติมเต็มทุกซอกมุม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง (SLUs) ที่มีการไหลตัวที่ดี เซ็ตตัวในเวลาที่เหมาะสม มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อย มีความทนทานไม่ละลายน้ำ และสามารถรับแรงอัดได้สูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเตรียมสูตรส่วนผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ระบบ OPC-CAC-CS
2. ทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่ (fresh mortar properties) เพื่อหาค่าการไหลตัว เวลาในการเซ็ตตัว และพฤติกรรมการไหลตัว
3. ทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน เพื่อศึกษาการรับแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์
4. ทดสอบความคงทนในการใช้งาน โดยการวัดอัตราการดูดซึมน้ำ
5. วิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปรับระดับพื้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับปูพื้นที่ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง ที่มี
ความสามารถในการใช้งานที่ดีและสามารถรับแรงอัดสูงเพียงพอต่อการใช้งาน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับปรับระดับพื้นได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสะดวกในการนำมาใช้งานและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การนำมาเทพื้นเพื่อซ่อมแซมพื้นผิวเดิมที่เสียหายไม่ว่าจะเป็นพื้นกระเบื้องหรือพื้นคอนกรีตที่มีผิวหน้าขรุขระ นอกจากนี้ใช้ปรับปรุงพื้นผิวเดิมที่เสียหายแล้ว ยังสามารถนำไปเทพื้นสำหรับ ลานจอดรถ พื้นโรงงาน พื้นคลังเก็บสินค้า พื้นสนามกีฬาและอื่นๆ จึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของปูนเทพื้นมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการนำปูนซีเมนต์ขาว หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ (CAC) มาใช้เพื่อปรับปรุงในเรื่องของความแข็งแรง อีกทั้งยังช่วยให้เซตตัวเร็วขึ้นและช่วยลดการหดตัว

2.2 แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ (CAC)

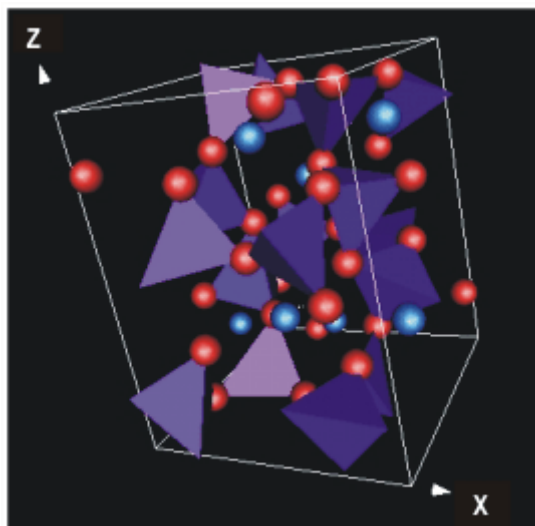
ปูนซีเมนต์ที่มีอะลูมินาสูง (เช่น >40%) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดเร็ว เนื่องจากแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การสานตัวกันเป็นผลึกรูปเข็มของ Ettringite เกิดขึ้นได้รวดเร็วและให้ความแข็งแรงในช่วงต้นได้ดี⁽²⁾ เมื่อนำปูนซีเมนต์ชนิดนี้ผสมน้ำจะทำให้เกิดความร้อนมาก ซึ่งเป็นกรป้องกันไม่ให้คอนกรีตแข็งตัวด้วยความเย็นจัดเสียก่อน คอนกรีตซึ่งผสมด้วยปูนซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวแล้ว (ระหว่าง 4 - 6 ชั่วโมง) ต้องรดน้ำหรือคลุมให้ชื้นอยู่เสมอจนครบ 24 ชั่วโมง เพื่อชดเชยน้ำที่ระเหยไปโดยความร้อนอันเกิดขึ้นในขณะที่คอนกรีตกำลังแข็งตัว

แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมออกไซด์และอะลูมินา (CaO-Al₂O₃) ซึ่งจะต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา (CaO-SiO₂)⁽³⁾

2.2.1 เฟสของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์⁽³⁾

2.2.1.1 แคลเซียมโมโนอะลูมิเนต (CA)

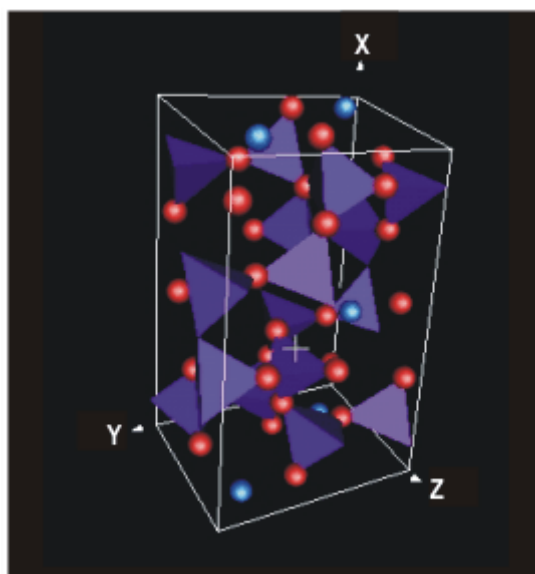
เป็นเฟสหลักที่ทำให้แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์สามารถรับแรงได้ดี เนื่องจากก่อให้เกิดความแข็งแรงค่อนข้างสูงในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก และเฮกซะโกนอลมี Symmetry P21/n, Z=12 และ $D_x = 2.945 \text{ g/cm}^3$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมโมโนอะลูมิเนต(CA)⁽³⁾

2.2.1.2 แคลเซียมไดอะลูมิเนต(CA₂, Grossite)

แคลเซียมไดอะลูมิเนตหรือที่เรียกว่ากลอสไซต์ มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกมี Symmetry C2/c, Z=4 and $D_x=2920 \text{ kg/m}^3$ มีโครงสร้างพื้นฐานแบบเตตระโกนอลของ AlO_4 บางส่วนของออกซิเจนอะตอมจะจับกับสองเตตระฮีดรอนและส่วนที่เหลือจะจับกันระหว่างขาที่เหลือทั้งสาม เฟสของแคลเซียมไดอะลูมิเนต (CA₂) นี้มีความทนไฟได้ดีกว่าแคลเซียมโมโนอะลูมิเนต (CA) แต่ให้ความแข็งแรงน้อยกว่าและเกิดขึ้นได้น้อยกว่า

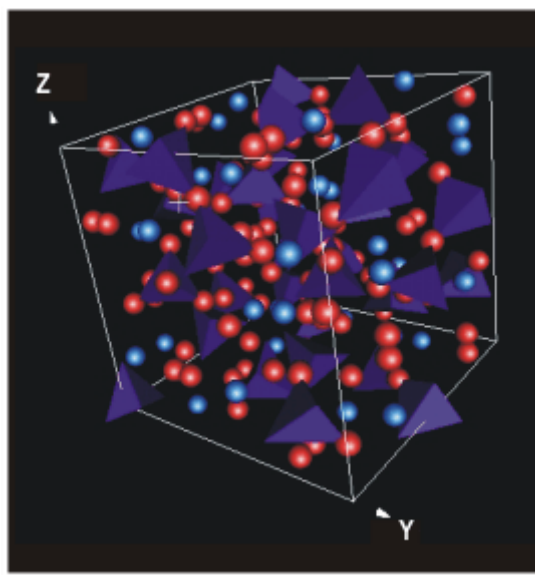


รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมไดอะลูมิเนต(CA₂, Grossite)⁽³⁾

2.2.1.3 Dodecacalcium Hepta - Aluminate ($C_{12}A_7$, Mayenite)

Dodecacalcium Hepta – Aluminate หรือ Mayenite มีช่องว่างในโครงสร้าง I43d โครงสร้างผลึกประกอบไปด้วยไอออนของ Ca^{2+} กับ 6 ขาที่เชื่อมต่อกับไอออนของออกซิเจนซึ่งยังมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์แต่มีความสมดุลของออกซิเจนไอออนที่ขาแต่ละขามาก

Mayenite เป็นเฟสที่เกิดขึ้นมากที่สุดในปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ไฮอะลูมินา และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันรวดเร็วกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CA)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของ Dodecacalcium Hepta - Aluminate ($C_{12}A_7$, Mayenite)⁽³⁾

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

เป็นตัวช่วยยึดประสานโครงสร้างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตแข็งแรงขึ้น โดยปูนซีเมนต์จะมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันซึ่งแบ่งได้ 5 ชนิดคือ⁽⁴⁾

2.3.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.3.1.1 ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)

เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา เช่น สะพาน ถนน สนามบิน และใช้งานในสภาวะอากาศที่ไม่รุนแรง เป็นต้น

2.3.1.2 ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement)

เหมาะสำหรับใช้กับงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนสูงหรือทนต่อเกลือของซัลเฟตได้บ้างพอสมควร เช่น งานก่อสร้างเขื่อน

2.3.1.3 ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งตัวเร็วหรือให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement)

โดยสามารถให้กำลังที่สูงในช่วงระยะ 7 วันแรกของการบ่ม เพราะมีความละเอียดมากกว่า ปูนซีเมนต์ธรรมดาและมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันคือ มีปริมาณสารประกอบของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) มากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งช่วยให้ปฏิกิริยาในซีเมนต์เกิดขึ้นได้รวดเร็วในช่วงแรก เหมาะสำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วหรืองานที่ต้องการใช้เร่งด่วน เช่น ถนนที่มีการจราจรคับคั่ง แต่มีข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานที่มีโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น สร้างเขื่อน เพราะความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เกิดขึ้นสูงมาก ซึ่งอาจทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้

2.3.1.4 ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่มีอัตราการคายความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ที่ต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการคายความร้อน

2.3.1.5 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต้านทานซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistant Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะทนต่อซัลเฟตได้สูง เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนตที่ต่ำเหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตมาก เช่น งานที่มีการก่อสร้างบริเวณทะเลหรือใกล้ทะเล แต่ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังรับกำลังอัดที่ค่อนข้างช้า

2.3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มีสารประกอบอยู่หลายชนิด ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดจะส่งผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ มากน้อยแตกต่างกันดังนี้⁽⁴⁾

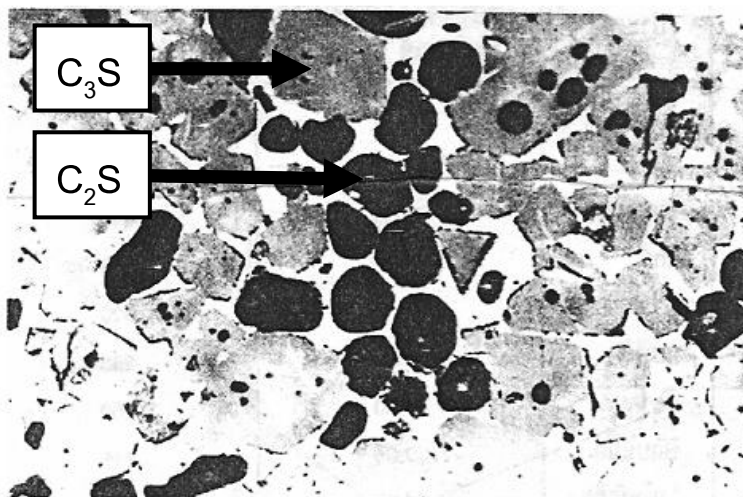
2.3.2.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO \cdot SiO_2$, C_3S)

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างคล้ายผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม สมบัติของสารประกอบ C_3S จะเหมือนกันกับสมบัติของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายในเวลา 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกของการบ่ม การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความ

ร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม ปริมาณของสารประกอบ C_3S ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 35-55

2.3.2.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2, C_2S$)

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างค่อนข้างกลม สมบัติของสารประกอบ C_2S จะเหมือนกันกับสมบัติของสารประกอบ C_3S เมื่อผสมน้ำจะเกิดการแข็งตัว เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันกับสารประกอบ C_3S ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบ C_2S จะก่อให้เกิดความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม และปริมาณของสารประกอบ C_2S ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15-35



รูปที่ 2.4 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ

2.3.2.3 ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3, C_3A$)

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีสีเทาอ่อน โดยสารประกอบ C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำในทันที ก่อให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว (Flash Set) และเกิดความร้อนขึ้นอย่างมากประมาณ 850 จูลต่อกรัม กำลังอัดของสารประกอบ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายในระยะเวลาประมาณ 1-2 วัน แต่พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับ C_3S ส่วนปริมาณของสารประกอบ C_3A ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7-15

2.3.2.4 เทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF)

จะทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาทีเหมือนกับปฏิกิริยาของสารประกอบ C_3A แต่เกิดความร้อนขึ้นน้อยกว่า ประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดที่ได้ค่อนข้างต่ำ ปริมาณของสารประกอบ C_4AF ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5-10

2.3.2.5 ยิปซัม ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดเม็ดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เฟสเกิดกำลังอัดสูงสุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด โดยปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณของแอลคาไลน์ออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และ K_2O รวมทั้งปริมาณของสารประกอบ C_3A

2.3.2.6 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

หินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ ส่วนใหญ่จะมี MgCO_3 เจือปน ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวเป็น MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นเม็ดปูนซีเมนต์ ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO โดยจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดสารประกอบที่ไม่อยู่ตัว มีปริมาตรเพิ่มขึ้น จนคอนกรีตแตกร้าวได้

2.3.2.7 แอลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O และ K_2O)

ที่อยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลเสียต่อคอนกรีต เว้นกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับแอลคาไลน์ได้มาผสมเป็นคอนกรีต โดยผลจากปฏิกิริยาก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวได้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์⁽⁴⁾

องค์ประกอบทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าเฉลี่ย
CaO	60-67	64.4
SiO ₂	17-25	20
Al ₂ O ₃	3-8	5.8
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0	3.2
MgO	0.1-4.0	0.5
Na ₂ O	0.1-1.3	0.5
K ₂ O	0.1-1.3	0.5
SO ₃	0.5-3.0	2.6

2.3.3 ปฏิกิริยาในปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ⁽⁴⁾ ดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาในสารละลาย โดยปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย เช่น Ca²⁺ Al³⁺ Si²⁺ และ OH⁻ เป็นต้น ไอออนเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นในซีเมนต์เฟส

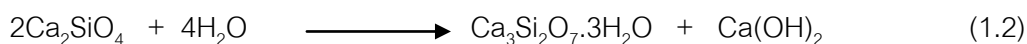
2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นโดยตรงที่บริเวณผิวของของแข็ง ไม่จำเป็นต้องอยู่ในรูปของสารละลาย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Solid State Reaction

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะเกิดแบบอาศัยสารละลาย และเมื่อซีเมนต์เฟสเกิดการแข็งตัวแล้วจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างของแข็ง สำหรับปูนซีเมนต์จะประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้สารประกอบอีกหลายรูปแบบ โดยสามารถแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นส่วนๆ ดังต่อไปนี้

2.3.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S และ C₂S

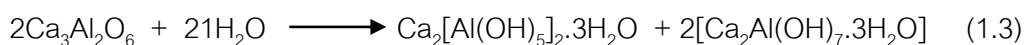
เมื่อผสม C₃S กับน้ำจะเกิดไอออนของแคลเซียม (Ca²⁺) และของไฮดรอกไซด์ (OH⁻) อย่างรวดเร็วทำให้สารละลายที่ได้มีความเป็นด่างสูงคือมีค่า pH สูงกว่า 12 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า ไฮโดรไลซิส เกิดขึ้นอย่างมากในช่วงระยะแรกและจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่

ยังคงเกิดอยู่ตลอดเรียกว่า ระยะดอร์แมนต์ (Dormant Period) หรือ ระยะสงบ คือระยะที่ ปูนซีเมนต์อยู่ในสภาพเหลวเป็นเวลานานหลายชั่วโมง ทำให้สามารถเทหรือหล่อคอนกรีตเข้าแบบ หล่อได้ในช่วงระยะนี้ ก่อนที่คอนกรีตจะเริ่มแข็งตัวมากขึ้น การลดลงของปฏิกิริยาสืบเนื่องจากการ เพิ่มขึ้นของอิออนของ Ca^{2+} และ OH^- ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น เมื่อถึงจุดหนึ่งที่มีความเข้มข้นของอิออนในสารละลายสูงพอ ทำให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาจึงเกิดลดลงและในขณะเดียวกัน C_3S จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง โดย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของ C_3S ทำให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็น สารเชื่อมประสานล้อมรอบบริเวณผิวของ C_3S หนาแน่นขึ้นและปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ยากขึ้นแต่ยังคงมี ต่อไป ส่วน C_2S จะทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับ C_3S แต่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่า เพราะ C_2S ไม่ค่อยไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ C_3S ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่าง C_2S กับน้ำจึง น้อยกว่ากรณีของ C_3S กับน้ำ การเกิดปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 1.1 และสมการที่ 1.2



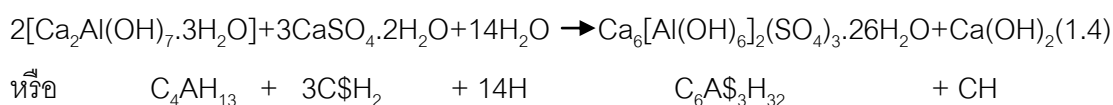
2.3.3.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบ C_3A จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างฉับพลันของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 1.3⁽⁵⁾



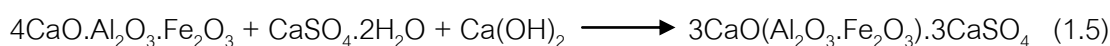
ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วมากจนเกินไป จำเป็นต้องผสมยิปซัม เพื่อหน่วงปฏิกิริยาดังกล่าว เพราะอนุภาคของ C_3A จะทำปฏิกิริยากับอิออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) ได้ สารประกอบแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต ($\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) หรือเรียกว่า Ettringite

โดยยิปซัมจะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาคของ C_3A แสดงดังสมการที่ 1.4⁽⁴⁾



2.3.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ แสดงดังสมการที่ 1.5⁽⁵⁾



ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยกว่า โดยสารประกอบเหล็กออกไซด์จะทำปฏิกิริยาคลายกับอะลูมิเนียมออกไซด์ และสามารถแทนที่กันได้ ยิปซัมจะเข้าห่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าการห่วงปฏิกิริยาของ C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมินेटและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ผลผลิตนี้มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายกับ Ettringite และสามารถเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของแคลเซียมอะลูมิเนียมเฟอร์ไรต์ที่มี SO_4^{2-} ต่ำลงได้

2.3.3.4 ปฏิกิริยาของ Ettringite

ปฏิกิริยาของ Ettringite แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้⁽⁴⁾

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิด Ettringite ที่มีลักษณะยาวคล้ายเข็ม จะเกิดขึ้นเมื่อมี อีออนของ SO_4^{2-} ที่เพียงพอ การเกิด Ettringite เพิ่มมากขึ้นรอบๆอนุภาค C_3A ทำให้ปฏิกิริยาของ C_3A-H_2O เกิดได้ยากขึ้นและปฏิกิริยาดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและใช้เวลานานหลายชั่วโมง เมื่ออีออนของ SO_4^{2-} ทำปฏิกิริยาหมดแล้ว อนุภาค C_3A จะทำปฏิกิริยากับ Ettringite และเปลี่ยนไปเป็น Ettringite ที่มี SO_4^{2-} น้อยลง เรียกว่า แคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมินेट [$3(Ca_4[Al_2(OH)_{14}](SO_4) \cdot 5H_2O)$]

ขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาประมาณ 12-36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมินेटจะสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็น Ettringite เมื่อได้อีออนของ SO_4^{2-} ซึ่งเป็นเหตุผลหลักของการเกิดการ กัดกร่อนของซัลเฟต เพราะ Ettringite มีปริมาณมากกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมินेटมาก จึงทำให้คอนกรีตขยายตัวและแตกร้าวได้

2.3.4 ผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.3.4.1 ผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S

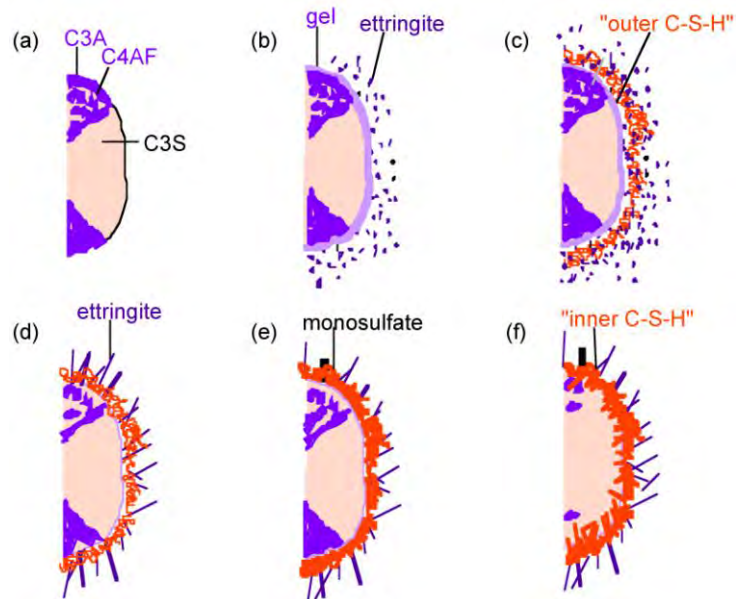
โดยผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นสองชนิด คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เฟส ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อสมบัติของซีเมนต์เฟสมากที่สุด แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเริ่มเกิดขึ้นมากเมื่อพ้นระยะดอร์แมนต์ โดยจะเกิดขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ขยายออกจากเม็ดปูนซีเมนต์เข้าสู่ช่องว่างและเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนซีเมนต์ขยายเข้าสู่ภายในเม็ดปูนซีเมนต์ เมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกันก็จะสามารถรับกำลังอัดได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีอยู่ประมาณร้อยละ 50-70 โดยปริมาตร และอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆมีขนาดประมาณสารแขวนลอย (เล็กกว่า 1 ไมโครเมตรทุกมิติ) และมีความเป็นผลึกน้อยมาก (Poorly Crystalline) อัตราส่วนของสารประกอบแคลเซียมต่อซิลิเกตในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลาและปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สัญลักษณ์ทางเคมี $C_3S_2H_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยโดยประมาณของสารประกอบที่เกิดขึ้น⁽⁵⁾

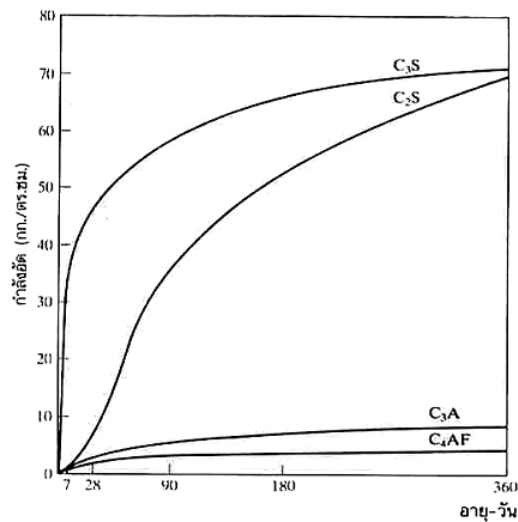
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)

ซีเมนต์เฟสประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตร เป็นผลึกที่มีรูปร่างหลายแบบ เมื่อสารละลายในซีเมนต์เฟสมีความเข้มข้นมากพอจะทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ตกผลึก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นจะเพิ่มจำนวนและขยายตัวเข้าสู่โพรงคาปิลารีในซีเมนต์เฟส โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขยายเข้าสู่ที่ว่างเท่านั้นและหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เฟสมีความคงทนลดลง เนื่องจากเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และถูกชะล้างออกมาได้ง่าย นอกจากนี้กำลังอัดของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่ได้จากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต⁽⁵⁾



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (a) ปฏิกิริยาเริ่มต้น, (b) หลัง 10 นาที, (c) หลัง 10 ชั่วโมง, (d) หลัง 18 ชั่วโมง, (e) 1-3 วัน, และ (f) หลัง 2 สัปดาห์⁽⁶⁾

การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์แสดงดังรูปที่ 2.5 รูปแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยอนุภาคของปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยรูป (a) ในช่วง 10 นาทีแรกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยากับยิปซัมก่อตัวเป็น Amorphous gel ที่ผิวของอนุภาคซีเมนต์ จากนั้น Ettringite จะก่อตัวเกิดเป็นผลึกเป็นแท่งสั้นๆ ดังรูป (b) จากนั้นการพัฒนาปฏิกิริยาก็เกิดอย่างต่อเนื่อง โดยหลังจาก 3 ชั่วโมงไปแล้ว 30% ของซีเมนต์จะฟอร์มตัวเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ C-S-H และหลังจากเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง C_3S จะผลิต Outer C-S-H ที่ผิวนอกซึ่งพัฒนามาจาก Ettringite อีกทีหนึ่ง จากนั้นหลัง 18 ชั่วโมง C_3A จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ก่อตัวเป็น Ettringite ลักษณะแท่งยาวดังรูป (d) และจะสานตัวกันไปเรื่อยๆ เป็น Hydrating shell ที่ผิวหน้าของ C_3A และเมื่อผ่านไป 1-3 วัน C_3A จะทำปฏิกิริยากับ Ettringite กลายเป็น Monosulfate ดังรูป (e) และ C-S-H ก็เริ่มโตขึ้นใหญ่ๆ ผิวของ C_3S อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วงนี้ก็ขึ้นกับปริมาณน้ำที่แพร่เข้ามา และหลังจาก 2 สัปดาห์การเกิดปฏิกิริยาก็จะสมบูรณ์ขึ้น ด้วยเส้นใยของ C-S-H ที่สานตัวกันอย่างสมบูรณ์ดังรูป (f)⁽⁶⁾



รูปที่ 2.6 การพัฒนาก้ำลัษัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ขอข้อมูลมาจาก บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์โดยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

Composition	Portland cement type I	Calcium Aluminate Cement
	(wt%)	(80% Al ₂ O ₃ Grade) (wt%)
SiO ₂	20.10	0.00
Al ₂ O ₃	5.03	79.75
Fe ₂ O ₃	3.55	0.16
CaO	65.45	18.65
MgO	1.00	0.00
SO ₃	1.94	-
LOI	2.09	-
Na ₂ O	< 0.01	1.33
K ₂ O	0.53	0.00
TiO ₂	0.24	0.01
P ₂ O ₅	0.06	-

2.4 แอนไฮไดรต์ (Calcium Sulfate)

Anhydrite (CaSO_4) เป็นสารประกอบซัลเฟตชนิดหนึ่ง แต่แตกต่างตรงที่ไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ มี CaO 41.2%, SO_3 58.8% การนำแอนไฮไดรต์ มาบดผสมกับซีเมนต์ทำให้มีคุณสมบัติการไหลตัวดีกว่าปกติ การแกะแบบทำได้ง่าย

ธีรวัฒน์ วัฒนิน และคณะ⁽⁷⁾ ได้ศึกษาการนำแร่แอนไฮไดรต์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เหลือจากการทำเหมือง มาใช้ผสมในคอนกรีตแทนวัสดุมวลรวมละเอียด พบว่ามวลรวมละเอียดแอนไฮไดรต์มีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับมวลรวมหยาบ และค่ากำลังอัดที่อายุ 7,14,28 วันของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมละเอียดแอนไฮไดรต์ จะเพิ่มมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ทดแทนมวลรวมละเอียดและค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตปกติ โดยเฉพาะที่ 28 วันมีค่ากำลังอัดสูงกว่าถึง 38.53 %

2.5 หินปูน (Limestone)

มีสูตรทางเคมีคือ CaCO_3 ใช้ผสมลงไปปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและช่วยลดการหดตัวของหินปูนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีเป็นชนิดละเอียดมีขนาด 1-2.5 mm.

2.6 ทราย (Sand)

ทรายจัดเป็นมวลรวม (Fine aggregates) ประเภทหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานที่กระจายอยู่ที่ซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้เกิดความแข็งแรง และช่วยลดการหดตัวทำให้รูปร่างของคอนกรีตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อถูกใช้งานในระยะเวลานานๆ

2.7 น้ำ (Water)

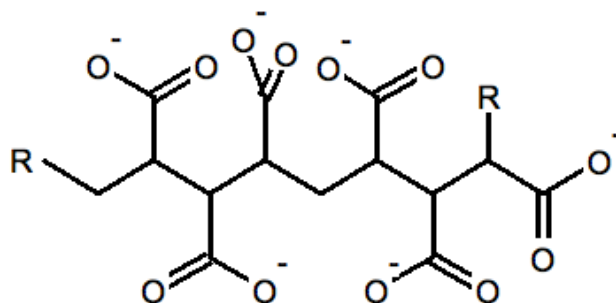
น้ำ (Water) ในการทดลองนี้ใช้น้ำกลั่น น้ำมีหน้าที่หลักคือ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) กับปูนซีเมนต์ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ และเคลือบหินทรายให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ และใช้บ่มคอนกรีตมีให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ตลอดจนความทนทานของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว

สารเคมี

2.8 สารปรับการไหลตัว (Super plasticizer)

สารปรับการไหลตัวเมื่อละลายน้ำแล้ว จะถูกดูดซับที่ผิวของผงซีเมนต์ซึ่งจะไปห่อหุ้มส่วนผสมอื่นๆ โดยเฉพาะส่วนผสมที่มีเหลี่ยมมุม ลดการเสียดทานทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการไหลตัวได้ดี การวิจัยครั้งนี้ใช้สารปรับการไหลตัวสองชนิดคือ MELFLUX 1641 F และ MELFLUX 2651 F

จากบริษัท O-BASF The chemical Company ซึ่งทั้งสองชนิดนี้ประกอบด้วยสารพอร์ลิเมอร์ หลักคือ polycarboxylate มีโครงสร้างดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของ Polycarboxylate

สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของสารปรับการไหลตัวที่ใช้ในงานวิจัยได้ข้อมูลมาจาก บริษัท O-BASF The chemical Company ดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.9 สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator)

ใช้ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อให้เวลาการเซตตัวของปูนซีเมนต์อยู่ในช่วงเวลาที่ต้องการ ในการวิจัยครั้งนี้ใช้สารเร่งปฏิกิริยา คือ ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3)

2.10 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarder)

มีคุณสมบัติตรงข้ามกับสารเร่งปฏิกิริยา ช่วยยืดเวลาการเซตตัวของปูนซีเมนต์ให้ยาวออกไป ในการวิจัยครั้งนี้ใช้สารหน่วงปฏิกิริยา คือ ซิตริกแอซิด (citric acid)

2.11 สารช่วยให้ปฏิกิริยาคงตัว (Stabilizer)

มีคุณสมบัติทำให้ส่วนผสมเกิดการอุ้มน้ำ มีส่วนช่วยให้เกิดการไหลตัวเล็กน้อยและช่วยอุ้มน้ำไว้ให้เกิดปฏิกิริยาดังส่วนหนึ่ง ในการวิจัยครั้งนี้ใช้สารช่วยให้ปฏิกิริยาคงตัวคือ เมโทเซล (methocel) ซึ่งเป็น cellulose ชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของสารปรับการไหลตัว⁽⁸⁾

Physical and chemical properties		
	MELFLUX 1641 F	MELFLUX 2651 F
Form	powder	powder
Colour	yellowish to brown	yellowish to brown
Odour	characteristic	characteristic
pH value	approx. 6.5 - 8.5	approx. 6.5 - 8.5
	(20%(m), 20 °C)	(20%(m), 20 °C)
Flash point	Not applicable	Not applicable
Ignition temperature	approx. 370 °C	approx. 410 °C
Minimum ignition energy	10 - 30 mJ	-
Bulk density	300 - 600 kg/m ³	300 - 600 kg/m ³
Solubility in water	completely soluble	soluble
	> 550 g/l (15 °C)	

2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Emoto, T.⁽¹⁾ และคณะ ได้ศึกษาสิ่งที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลตัวของซีเมนต์จากการเติม Additive แต่ละชนิดโดยได้ทดสอบกับปูนซีเมนต์ 2 ระบบ คือ Ettringite system และ C-S-H system พบว่าสารปรับการไหลตัว (Superplasticizer) ชนิด MF 2651F จะช่วยให้ปูนซีเมนต์มีการไหลตัวดีที่สุด และ MF PP100F ถึงแม้ว่าให้การไหลตัวระดับปานกลางแต่มีผลในการช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ และพบว่าการเติมสารหน่วงปฏิกิริยา (Retarder) ชนิด Tartaric acid จะมีความรุนแรงมากกว่า Citric acid และการเติม Citric acid 0.2 wt% จะช่วยเพิ่มการไหลตัวของปูนซีเมนต์ได้

Felekoglu, B.⁽⁹⁾ และคณะ ได้ศึกษาการเติมหินปูน (Limestone) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตจำนวน 3 ชนิด โดยเติมลงในปูนซีเมนต์ปรับระดับพื้น (Self-leveling underlayment) ในปริมาณที่ต่างกันคือ 10%, 20% และ 30% และใช้น้ำกับสารเติมแต่ง (Additive) ในปริมาณคงที่ พบว่าการเติมหินปูน (Limestone) 10% จะมีความแข็งแรงที่ 28 วันสูงที่สุด และหินปูนที่เติมเข้าไปจะช่วยลดการหดตัวได้ แต่ถ้าเติมมากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงลดลง และพบว่าหินปูนชนิดละเอียด (Powder) ช่วยเพิ่มความหนืดได้ดี

Hanehara, S.⁽¹⁰⁾ และคณะ ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และสารเติมแต่ง โดยใช้สารเติมแต่งทั้งหมด 4 ชนิดคือ Lignin sulfonate, Naphthalene sulfonate และ Polycarboxylate พบว่า Lignin sulfonate จะช่วยชะลอการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์ได้ด้วยการทำให้เกิด Ca^{2+} จากซีเมนต์และ Free lime ส่วน Naphthalene sulfonate จะดูดซับลงบนผิวอนุภาคซีเมนต์และก่อให้เกิดประจุลบขึ้น ทำให้เกิดการผลักตัวกันของอนุภาคซึ่งมีผลทำให้เกิดการไหลตัวที่ดีและลดการใช้น้ำ, Polycarboxylate ทำหน้าที่เป็นสารปรับการไหลตัว (Superplasticizer) ที่ดี แต่ถ้าใช้ในสูตรปูนซีเมนต์ที่มีซัลเฟตมาก จะทำให้ลดการไหลตัว

Gasparo, A.⁽²⁾ และคณะ ทำการศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นเบส จะมีฟองอากาศเกิดขึ้นมากและฟองอากาศเหล่านี้จะไปขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงต้องใช้ Polycarboxylate ether (PCE) เติมเข้าไปซึ่งจะช่วยให้เนื้อปูนซีเมนต์ยึดเกาะกันดีขึ้นป้องกันฟองอากาศและลดการระเหยของน้ำได้

Sahmaran, M.⁽¹¹⁾ และคณะ ทำการศึกษาผลกระทบบของ Chemical admixture และ Mineral admixture ต่อสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่า สมบัติหลังผสมเสร็จใหม่ขึ้นกับชนิดของสารปรับการไหลตัว ซึ่ง Polycarboxylate จะให้สมบัติที่ดีที่สุดจากที่ทดลองทั้งหมด 3 ชนิด ความละเอียดของ mineral admixture มีส่วนช่วยเพิ่ม Workability ได้และนอกจากความละเอียดแล้ววัสดุที่หยาบกว่า แต่มีความเรียบกลมก็ช่วยเพิ่ม Workability ได้เหมือนกัน และการใส่ mineral admixture มากเกินไปในปูนซีเมนต์ก็จะไปลดความแข็งแรงลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ

- แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ชนิดอะลูมินา 80%(SECAR 80 ของบริษัท Kerneos(China) Aluminate Technologies)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน))
- แอนไฮไดรท์ (ชนิดธรรมชาติ จากบริษัท บีเคจีมิเนอรัล จำกัด)
- ททราย (แม่น้ำ)
- น้ำกลั่น

*องค์ประกอบทางเคมี เฟสและสมบัติทางฟิสิกส์ได้แสดงไว้ในหน้าที่ 15-18

3.1.2 สารเคมี

- สารปรับการไหลตัว (Superplasticizer) (MELFLUX 1641 F, 2651 F ของบริษัท O-BASF The chemical Company)
- * ข้อมูลของสารปรับการไหลตัว เกี่ยวกับสมบัติทางฟิสิกส์แสดงไว้ในหน้าที่ 19
- สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerater) (Lithium Carbonate, ของบริษัท May & Baker LTD)
- สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarder) (Citric acid (27104) ของบริษัท Riedel-De Haen AG)
- สารช่วยให้ปฏิกิริยาคงตัว (stabilizer) (Methocel (J75MS) ของบริษัท The Dow Chemical Company)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง
- เครื่องผสมปูน Hobart mixer
- อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว Slump test (Standard cone)

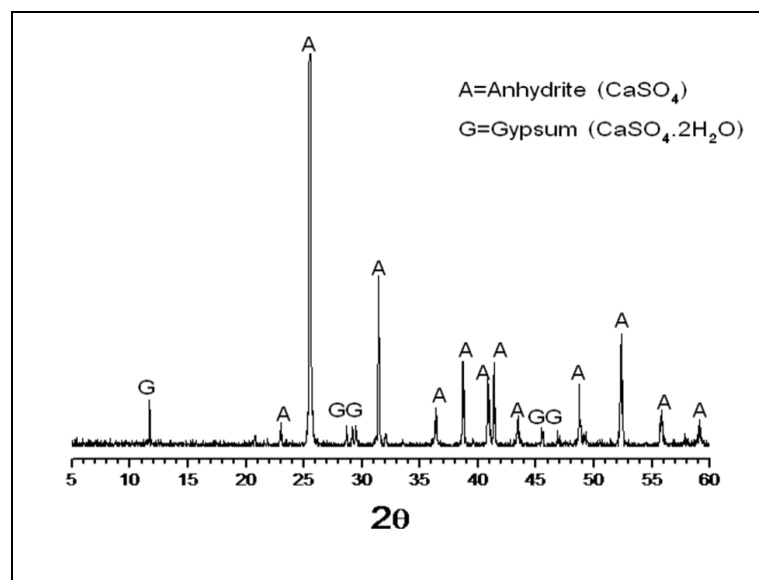
- อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว (V-funnel)
- อุปกรณ์ทดสอบเวลาการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์ (Vicat apparatus)
- เครื่องวัดความหนืด Brookfield viscometer (รุ่น RVDV-I+ ผลิตโดยบริษัท Brookfield Engineering Laboratories)
- โมลด์ทองเหลืองหล่อปูนซีเมนต์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร
- เครื่องทดสอบความแข็งแรงอัด Compressive strength (เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท INSTRON)
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส X-ray diffractometer (รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker)
- เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค Scanning electron microscope (รุ่น JSM-6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL)

3.3 วิธีทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์วัสดุดิบ

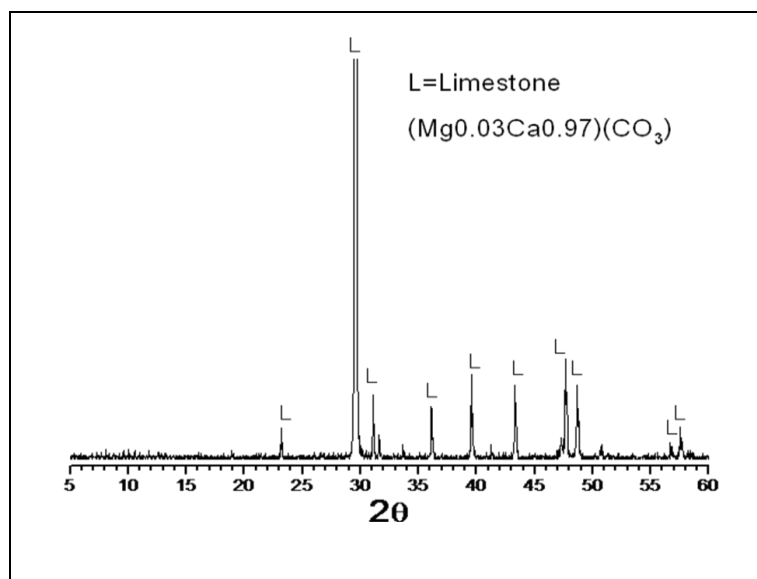
การวิจัยในครั้งนี้ได้นำเอา Anhydrite (CaSO_4) และ Limestone (CaCO_3) มาตรวจสอบเฟสองค์ประกอบได้ผลการตรวจสอบดังนี้

เมื่อนำ Anhydrite มาวิเคราะห์เฟสด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) พบว่ามีเฟสที่เกิดขึ้นตรงตามธาตุองค์ประกอบของ Anhydrite (JCPDS 01-074-2421) และพบเฟสของยิปซัมปรากฏรวมอยู่ด้วย (JCPDS 01-076-1746) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟ XRD แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ของแอนไฮไดรท์

จากการนำ Limestone มาวิเคราะห์เฟสด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) พบว่ามีเฟสที่เกิดขึ้นตรงตามธาตุองค์ประกอบ (JCPDS 01-089-1304) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟ XRD แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ของ Limestone

และได้นำ Limestone และทรายมาทำการกระจายตัวของขนาดอนุภาคซึ่งได้ผลการตรวจสอบดังนี้

จากการตรวจสอบขนาด Limestone โดยวิธี sieve analysis ในช่วงขนาด 1-2.5 mm. (ใช้ sieve 16 mesh (1.19 mm.) สำหรับขนาด 1 mm. และ 8 mesh (2.38 mm.) สำหรับขนาด 2.5 mm.) จากการตรวจสอบ พบว่าหินปูนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดดังนี้

มีขนาดน้อยกว่า 1.19 mm. = 12.52%

มีขนาดอยู่ระหว่าง 1.19 - 2.38 mm. = 86.15%

มีขนาดมากกว่า 2.38 mm. = 1.41%

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นทรายสำหรับงานเทพื้นที่หาซื้อได้ตามร้านค้าวัสดุก่อสร้างทั่วไป ได้ทำการตรวจสอบขนาดเม็ดทรายโดยวิธี sieve analysis ในช่วงขนาด 0.2-0.5 mm. (ใช้ sieve 80 mesh (0.177 mm.) สำหรับขนาด 0.2 mm. และ 35 mesh สำหรับขนาด 0.5 mm.) จากการตรวจสอบ พบว่าทรายที่ใช้ในการทดลองมีขนาดดังนี้

มีขนาดน้อยกว่า 0.177 mm. = 22.49%

มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.177 - 0.5 mm. = 48.78%

มีขนาดมากกว่า 0.5 mm. = 28.53%

3.3.2 การออกแบบการทดลอง

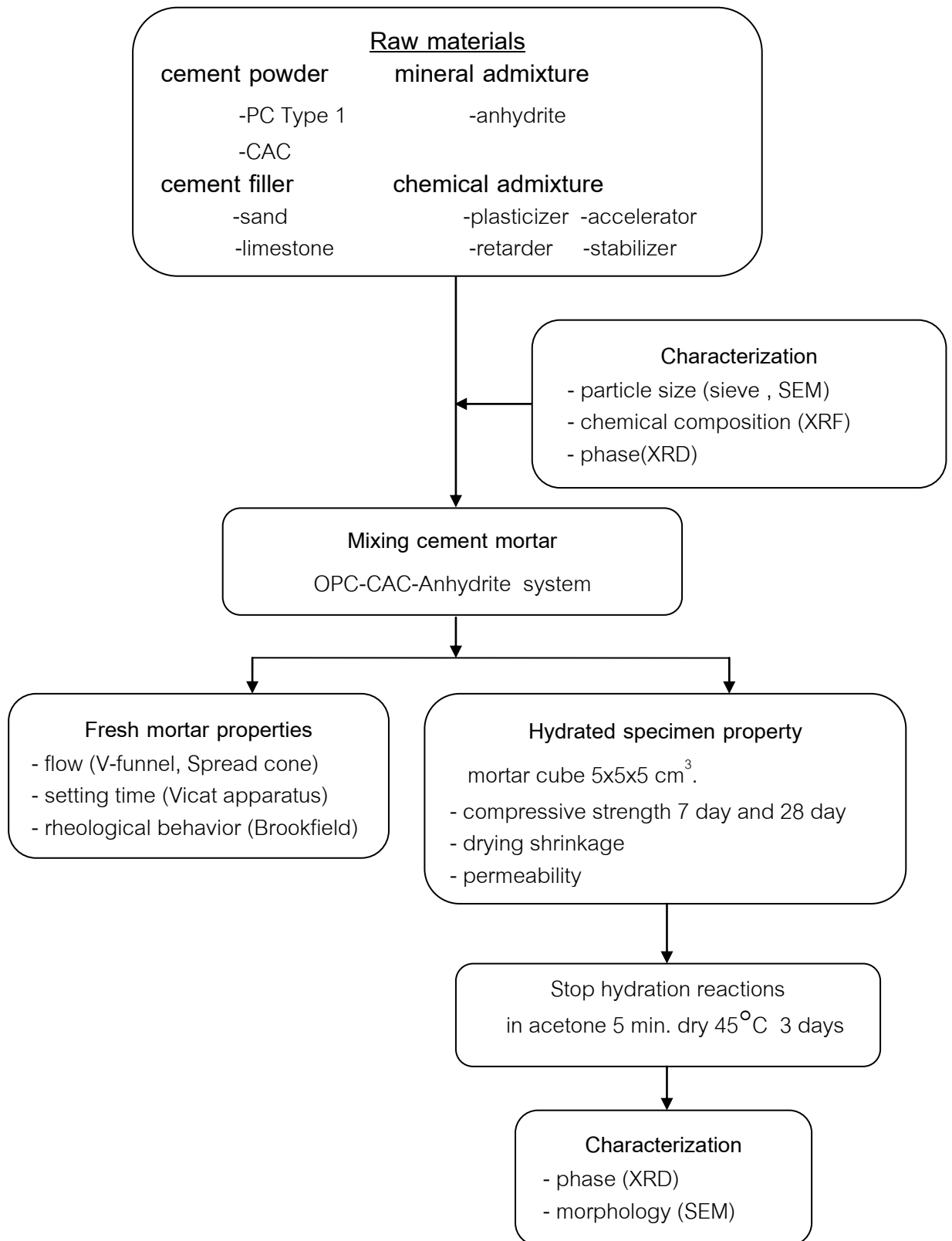
ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสูตรปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการใช้งานได้เหมาะสม พบว่าสูตรปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมนั้นมีส่วนประกอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ประมาณ 36 wt% และ 12 wt% ตามลำดับ

จากนั้นได้ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi method เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมที่สุด โดยต้องการความสามารถในด้านใช้งาน เช่น การไหลตัว และเวลาการเซ็ตตัว จึงได้ตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปร (P3) คือปูนซีเมนต์ (PC+CAC), สารปรับการไหลตัวและน้ำ ซึ่งแต่ละส่วนผสมได้ปรับปริมาณส่วนผสมเป็น 3 ระดับ (L3) ซึ่งจากการออกแบบการทดลองของ Taguchi method จะได้ความสัมพันธ์แบบ L9 orthogonal array, 3 parameters ซึ่งได้สูตรการทดลองดังตาราง

ตารางที่ 3.1 Taguchi method (L9 orthogonal array, 3 parameters)

Trial no.	PC+CAC, 48 wt%	SP, wt% (wt/c)	w/s
1	A1	0.8	0.20
2	A2	1.0	0.22
3	A3	1.2	0.24
4	B1	0.8	0.22
5	B2	1.0	0.24
6	B3	1.2	0.20
7	C1	0.8	0.24
8	C2	1.0	0.20
9	C3	1.2	0.22

3.3.3 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลอง

3.3.4 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.4.1 ขั้นตอนการผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

1. คำนวณและชั่งส่วนผสมและสารเคมีให้ได้ตามต้องการ ทั้งหมด 9 สูตร แต่สูตรหลักคือ สูตร A B และ C โดยในแต่ละสูตรนั้นมีปริมาณรวมของวัตถุดิบที่เท่ากันแต่ใช้ปริมาณของสารปรับการไหลตัวและปริมาณน้ำแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.1
2. ผสมสารเคมีและน้ำเข้าด้วยกัน แต่ทำการผสมน้ำเพียงครั้งเดียวกับสารเคมี (เพื่อนำน้ำอีกครั้งหนึ่งที่แบ่งไว้สำหรับผสมปูนก่อน จากนั้นจึงค่อยเทน้ำผสมสารเคมีลงไป) จากนั้นนำไปกวนผสม (stirred) เป็นเวลา 5 นาที
3. นำส่วนผสม (ปูนซีเมนต์) มาทำการผสมเข้าด้วยกัน (แบบแห้ง) ด้วยเครื่องผสม Hobart mixer โดยใช้ใบพัดกวนแบบซี่ลวดเพื่อผสมส่วนผสมต่างๆ ให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที ก่อนทำการผสมน้ำและสารเคมี
4. หยุดเครื่องแล้วทำการเปลี่ยนใบพัดกวนแบบซี่ลวดเป็นแบบใบพาย
5. นำสารเคมีที่เตรียมไว้จากข้อ 2. เทผสมลงไปอย่างช้าๆ พร้อมกับเปิดเครื่องผสม Hobart mixer จนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี ใช้เวลา 1 นาที
6. พอสอบ 1 นาทีแล้วให้ปิดเครื่อง และใช้ไม้พายกวนส่วนผสมที่อาจตกตะกอนอยู่ด้านล่าง ให้เข้ากัน
7. ปรับความเร็วของเครื่องผสม Hobart mixer เป็นระดับ 2 แล้วเปิดเครื่องกวนผสมปูนให้เข้ากันเป็นเวลา 4 นาที
8. ปิดเครื่อง นำปูนผสมเสร็จใหม่ออกใส่ภาชนะเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น การไหลตัวของปูน เวลาในการก่อตัวและความแข็งแรงอัด

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมในการเตรียมผสมปูนในระบบ OPC-CAC-C\$ System

Mixer (%wt)	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
PC 1	36	36	36	39	39	39	42	42	42
CAC	12	12	12	9	9	9	6	6	6
Anhydrite	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Limestone	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Sand	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Melflux	0.80	1.00	1.20	0.80	1.00	1.20	0.80	1.00	1.20
Li carbonate	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Citric acid	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Methocell	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Water (w/s)	0.20	0.22	0.24	0.22	0.24	0.20	0.24	0.20	0.22

หมายเหตุ : สารเคมีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักปูนเท่านั้น (เฉพาะน้ำหนัก PC1 รวมกับ CAC)

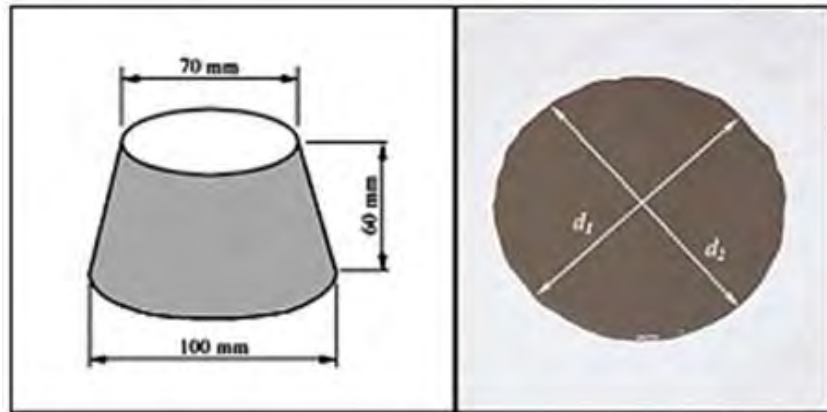
3.4 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

3.4.1 การทดสอบการไหลตัวของปูนซีเมนต์ผสมเสร็จใหม่ (Fresh mortar properties)

Slump Test

ได้ทำการหาค่าการไหลตัวด้วยวิธี Slump Test ตามมาตรฐาน ASTM C1437⁽¹²⁾ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- นำปูนผสมเสร็จใหม่ที่ได้ เทลงในอุปกรณ์ทดสอบรูปกรวยให้เต็ม จากนั้นยกกรวยขึ้นปล่อยให้ปูนไหลออกไปทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จนแน่ใจว่าปูนหยุดการไหลตัว
- วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปูน ทั้งสองด้านโดยกำหนดให้เป็น D1 และ D2
- บันทึกค่าที่วัดได้

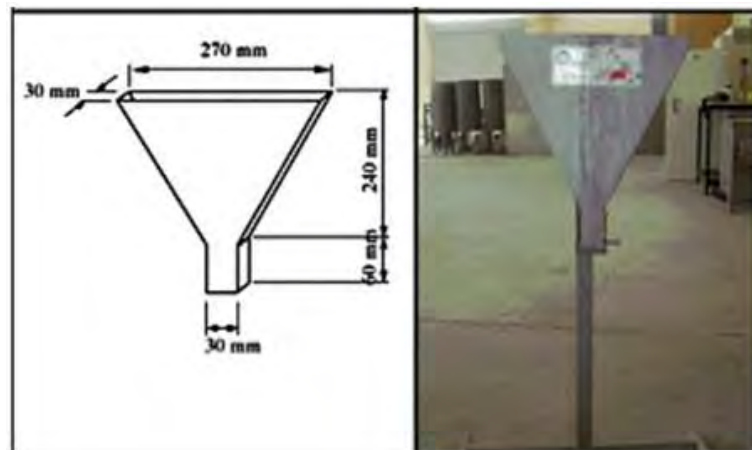


รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว slump test

V-funnel Test

ได้ทำการหาค่าการไหลตัวด้วยวิธี V-funnel Test^(9, 13) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำปูนผสมเสร็จใหม่ที่ได้ เทลงในอุปกรณ์ทดสอบรูปตัววี (v-funnel) ให้เต็ม ขณะเทปูนลงให้อุดรูด้านล่างไม่ให้ปูนไหล
2. เมื่อปูนเต็มแล้ว ให้เปิดรูที่ปิดไว้ปล่อยปูนให้ไหลลงพร้อมจับเวลา
3. สังเกตที่ด้านบน ขณะที่ปูนไหลลงไปเรื่อยๆ จนสังเกตเห็นแสงที่ปลายรูด้านล่าง ให้หยุดเวลา แล้วบันทึกเวลาที่ได้



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว V-funnel

3.4.2 การทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

Setting time

ได้ทำการหาเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง Vicat apparatus ตามมาตรฐาน ASTM C191-04b⁽¹⁴⁾ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำปูนผสมเสร็จใหม่เทลงในโมลด์พลาสติกจนเต็ม เพื่อวัดการแข็งตัวโดยใช้เครื่อง Vicat needle โดยจับเวลาตั้งแต่เริ่มทำการผสมปูนเข้ากับน้ำ
2. ตั้งค่าเครื่อง Vicat apparatus โดยเลื่อนปลายเข็มมาแตะที่ผิวหน้าของปูนที่อยู่ในโมลด์แล้วทำการล๊อคเข็มไว้ไม่ให้ขยับได้
3. ปรับค่าแถบอ่านค่าของ Vicat apparatus ให้เป็นศูนย์
4. ทำการปล่อยเข็ม Vicat apparatus ลงสู่เนื้อปูนที่อยู่ในโมลด์ สังเกตจนกว่าจะอ่านค่าได้เท่ากับ 25 มิลลิเมตร จึงบันทึกเวลาขณะนั้นเป็น initial setting time
5. ส่วนเวลา final setting time นั้น ให้ทำการปล่อยเข็ม Vicat needle ลงสู่เนื้อปูนที่อยู่ในโมลด์ สังเกตดูว่าปลายเข็มไม่สามารถเจาะเข้าไปในเนื้อปูนได้ ให้บันทึกเวลานั้นเป็น final setting time



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูน (Vicat apparatus)

3.4.3 พฤติกรรมการไหลตัว (Rheological behavior, using neat cement paste)

หลังจากทำการทดลองผสมปูนซีเมนต์ตามสูตรในตารางที่ 3.1 และทำการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมเสร็จใหม่ตามวิธีทดสอบข้อ 3.5.1 เสร็จแล้วพบว่า ได้สูตรปูนที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดในแต่ละสูตรคือสูตร A2, B1 และ C2 จึงได้นำมาหาพฤติกรรมการไหลตัวจากการวัดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer รุ่น RVDV-I+ ผลิตโดยบริษัท Brookfield Engineering Laboratories แล้ววาดกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และ shear rate

ซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้เลือกวิธีวัดตัวอย่างแบบ Small sample volume ซึ่งวิธีนี้จะให้ความแม่นยำในการวัด Shear stress และ Shear rate สูงมาก จึงต้องใช้เข็มวัดแบบ Coaxial cylinders type-smooth walled มีสูตรคำนวณ⁽¹⁵⁾ และขั้นตอนการทดลอง⁽¹⁶⁾ ดังนี้

$$\text{Shear rate } (S') = \left(\frac{2R_c^2}{R_c^2 - R_b^2} \right) \omega$$

$$\text{Shear stress } (F') = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

$$\omega = \text{angular velocity of spindle} = \left(\frac{2\pi}{60} \right) \text{rpm}$$

R_c = radius of container (mm)

R_b = radius of spindle (mm)

M = torque input by instrument

L = effective length of spindle

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดความหนืด Brookfield
2. เข็ม (spindle) เบอร์ 21
3. กระบอกใส่สาร

ขั้นตอนการทดลอง⁽¹⁶⁾

1. ติดตั้งเข็มเบอร์ 21 เข้ากับเครื่อง Brookfield พร้อมกับตัวจับกระบอกใส่สาร
2. ผสมสูตรปูนซีเมนต์สูตร ตามขั้นตอนวิธีการตอนผสม (ผสมเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์และแอนไฮไดรท์โดยไม่ใส่มวลรวม)

3. เทปูนซีเมนต์ผสมเสร็จใหม่ที่ได้ลงในกระบอกลีสารจากนั้นนำไปใส่เข้ากับตัวจับกระบอกลีสาร
4. จากนั้นให้เปิดเครื่อง Brookfield พร้อมกับปรับความเร็วของเครื่องไว้ที่ 30 rpm ค้างไว้ 30 วินาที เพื่อให้เนื้อปูนที่ผสมเกิดความเสถียร (Preshearing)
5. เมื่อครบ 30 วินาทีแล้วจึงปิดเครื่องทิ้งไว้ 20 วินาที
6. การทดลองครั้งนี้จะทำการปรับค่าความเร็วรอบจากน้อยไปมากและค่อยลดลงมา คือความเร็วรอบ (rpm) ตั้งแต่ 10 , 20 , 30 , 50 , 60 , 50 , 30 , 20 , 10 ตามลำดับ
7. ทำการปรับความเร็วรอบเป็น 10 rpm แล้วเปิดเครื่องค้างไว้ 20 วินาที อ่านค่าความหนืดและค่า % torque เมื่อครบวินาทีที่ 15
8. ปิดเครื่องทิ้งไว้ 20 วินาทีพร้อมกับปรับความเร็วของเครื่องไว้ที่ 20 rpm
9. เมื่อครบ 20 วินาทีแล้วจึงเปิดเครื่องค้างไว้ 20 วินาที อ่านค่าความหนืดและค่า % torque เมื่อครบ วินาทีที่ 15
10. ทำการปิดและเปิดเครื่องไปเรื่อยๆ (ตามขั้นตอนที่ 7-9) พร้อมปรับค่าความเร็วรอบ (rpm) เป็น 30 , 50 , 60 , 50 , 30 , 20 , 10 โดยจะทำการเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆ จากน้อยไปมาก เมื่อถึงความเร็วรอบสูงสุดคือ 60 rpm แล้วจึงค่อยๆ ลดความเร็วรอบลงมาตามลำดับ โดยแต่ละความเร็วรอบให้ปิดเครื่อง 20 วินาทีจึงค่อยเปิดเครื่องในความเร็วรอบถัดไป

3.4.4 การหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์ (Drying shrinkage)

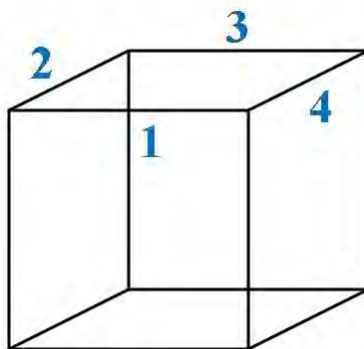
ทำการหาค่าการหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มในน้ำโดย

1. ผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรที่ต้องการ แล้วหล่อปูนลงในโมลด์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³ ทิ้งไว้ 1 วัน (24 ชม.) จึงถอดโมลด์ออก
2. วัดขนาดของก้อนปูนซีเมนต์ที่หล่อไว้ด้วย Vernier Caliper ทั้ง 4 ด้านเมื่อครบ 1, 3, 7 และ 28 วัน ดังรูปที่ 3.4
3. คำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\% \text{ การหดตัว} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100\%$$

L_1 = ความยาวเริ่มต้น

L_2 = ความยาวหลังการบ่ม



รูปที่ 3.7 จุดที่วัดขนาดหาการหดตัว

3.4.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (ASTM C1585-04⁽¹⁷⁾)

วิธีการวัดอัตราการดูดซึมน้ำ (rate of water absorption)⁽¹⁸⁾

1. นำตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มมาแล้ว 28 วัน ด้วยตู้ควบคุมความชื้น (อุณหภูมิ 30°C, ความชื้น 95%) มาอบที่อุณหภูมิ 50°C ในเตาอบ เป็นเวลา 3 วัน
2. เมื่ออบตัวอย่างครบ 3 วัน จากนั้นนำมาเก็บใน Desiccator เป็นเวลา 15 วัน
3. จากนั้นนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกค่า
4. นำตัวอย่างมอร์ตาร์มาทาด้วย Epoxy resin หรือกาวทาท่อน้ำโพลียูรีเทน บริเวณด้านข้างทั้งสองด้าน
5. นำตัวอย่างแช่ในภาชนะที่มีน้ำ โดยให้น้ำในภาชนะ สูงท่วมชิ้นตัวอย่างขึ้นมาในระดับประมาณ 3 มิลลิเมตร จากขอบล่างของด้านที่ไม่ทากาว ดังรูปที่ 3.5⁽¹⁹⁾
6. จับเวลาที่ 1, 5, 10, 20, 30, 60 นาที; 2, 3, 4, 5, 6 ชั่วโมง; 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 วัน โดยทุกๆครั้งที่ครบเวลาให้นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่าไว้ เพื่อหา Water absorption ตามสูตรของ Darcy's Law

$$\text{Water absorption } (I) = \left(\frac{M2 - M1}{a * d} \right)$$

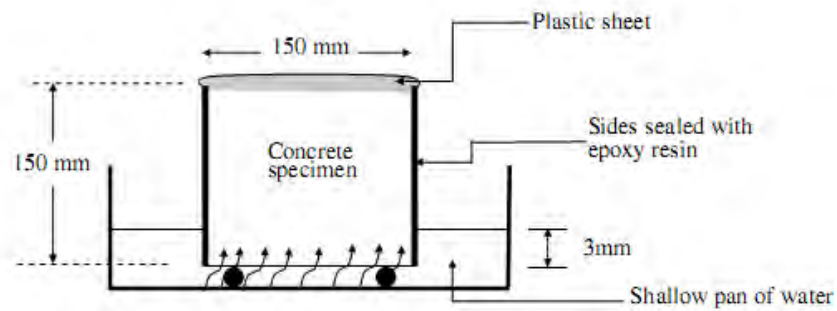
$M1$ = น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำ, g

$M2$ = น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำ, g

a = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง, cm^2

d = ความหนาแน่นของน้ำ, 1 g/cm^3

จากนั้น นำค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption, I) ที่ได้มาวาดกราฟหาความสัมพันธ์กับค่าสแควร์รูทของเวลาเพื่อหาอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) และอัตราการดูดซึมน้ำช่วงที่ 2 (Secondary Rate of Water Absorption)



รูปที่ 3.8 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ⁽¹⁹⁾

3.4.6 การทดสอบความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (ASTM C 109/C⁽²⁰⁾)

เมื่อทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่เสร็จแล้ว จึงนำปูนซีเมนต์ที่ได้มาหล่อขึ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์ มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดโมลด์ที่จะหล่อขึ้นงานให้สะอาดแล้วทาด้วยน้ำมันบางๆ เพื่อให้สามารถถอดขึ้นงานได้สะดวก (โมลด์ที่ใช้มีขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³)
2. เทปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่ที่ได้ลงในโมลด์จนเต็ม ปาดแต่งผิวหน้าให้เรียบร้อย
3. ทิ้งไว้ให้ปูนเกิดการแข็งตัวเป็นเวลา 1 วัน
4. พอลครบ 1 วันแล้วทำการถอดขึ้นงานออกจากโมลด์แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน
5. พอลครบกำหนดวันที่จะนำขึ้นงานไปทดสอบความแข็งแรง ให้นำขึ้นงานมาชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกค่าไว้สำหรับนำมาคำนวณหา unit weight, g/cm³ (density)
6. นำขึ้นงานไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงอัดด้วยเครื่อง Compressive strength รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท INSTRON โดยมี Load cell 100 kN. และใช้ Loading rate 2 mm./min. ดังรูปที่ 3.6 พร้อมบันทึกค่าแรงกดที่ได้แล้วนำมาคำนวณตามสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = ความแข็งแรงอัด (Compressive strength, MPa)

F = แรงกด (N)

A = พื้นที่ผิวสัมผัส(mm²)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Compressive strength รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท INSTRON

3.4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของปูนมอร์ตาร์

นำวัสดุดิบและชิ้นงานที่ได้มาศึกษาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 5 ถึง 60 องศา ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.10 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker

3.4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Scanning electron microscopy,SEM)

ศึกษาพื้นผิวภาคตัดขวาง (cross-section) ของชิ้นตัวอย่าง เพื่อดูการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและรูปร่างผลึกของปูนซีเมนต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope,SEM) รุ่น JSM-6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope,SEM)

รุ่น JSM-6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่

จากการออกแบบการทดลองโดยใช้ Taguchi method (L9 orthogonal array, 3 parameters) ได้สูตรปูนมอร์ตาร์ทั้งหมด 9 สูตรดังตารางที่ 4.1 และนำมาทำการทดลอง โดยมีผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 L9 orthogonal array, 3 parameters (The larger compressive strength, is the better)

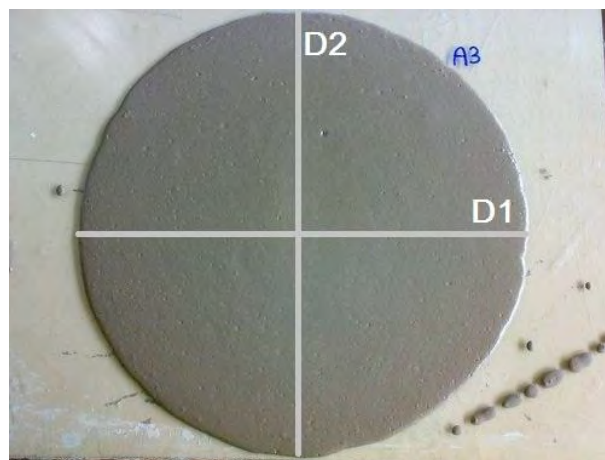
Trial no.	PC+CAC, 48 wt%	SP, wt% (wt/c)	w/s
1	A1	0.8	0.20
2	A2	1.0	0.22
3	A3	1.2	0.24
4	B1	0.8	0.22
5	B2	1.0	0.24
6	B3	1.2	0.20
7	C1	0.8	0.24
8	C2	1.0	0.20
9	C3	1.2	0.22

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่

Mix.	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	
V-funnel (s.)	11	3	2	3	2	3	2	3	2	
Slump test (mm.)	D1	190	260	303	275	330	250	320	275	400
	D2	195	255	300	273	327	255	325	273	405

ปูนมอร์ตาร์ที่มีสมบัติของปูนผสมเสร็จใหม่ที่ดื่มนั้นจะมีค่า V-funnel ประมาณ 3 วินาที ค่า spread test ประมาณ 300 มิลลิเมตร

จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 4.1 จะพบว่า ความสามารถในการไหลตัวของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารปรับการไหลตัว (Superplasticizer) และปริมาณของน้ำเป็นหลัก เช่น สูตร A1, A2, A3 ซึ่งเติมสารปรับการไหลตัว (Superplasticizer) ในปริมาณ 0.8, 1.0, 1.2 ตามลำดับและมีปริมาณน้ำ 0.2, 0.22 และ 0.24 ตามลำดับ(ตารางที่ 3.1, หน้า 26) ซึ่งสูตรที่มีปริมาณสารปรับการไหลตัว (Super plasticizer) และปริมาณน้ำมากที่สุด เช่น สูตร A3 จะพบว่ามีค่าการไหลตัวที่มากกว่าดังรูปที่ 4.1 แต่ถ้าใส่ปริมาณสารปรับการไหลตัว (Superplasticizer) และปริมาณน้ำที่มากเกินไป ดังเช่นสูตร C3 จะทำให้เกิดการแยกตัว (Segregation) ระหว่างซีเมนต์และวัสดุเติมแต่ง (Cement filler) และเกิดฟองอากาศอย่างรุนแรงที่ผิวหน้า ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 การทดสอบ spread test และจุดวัดความกว้าง



(a)



(b)

รูปที่ 4.2 (a) การแยกตัวระหว่างซีเมนต์และวัสดุเติมแต่งของสูตร C3, (b) การเกิดฟองอากาศอย่างรุนแรงที่ผิวหน้าขณะหล่อโมล

4.2 ผลการทดสอบเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์

ได้ทำการทดสอบเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C191-04b ด้วยเครื่อง Vicat apparatus โดยจับเวลาตั้งแต่เริ่มผสมปูน แล้วหาเวลาเริ่มต้นการเซตตัว (Initial setting time) จนถึงเวลาสุดท้ายของการเซตตัว (Final setting time) ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

Mix.		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Setting time (min.)	initial	70	96	185	140	181	115	237	122	> 240
	final	112	128	215	179	289	165	297	155	-

จากข้อกำหนดคุณลักษณะปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C150 ได้กำหนดเวลาการเซตตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ไว้ดังนี้ เวลาเริ่มต้นการเซตตัว (Initial setting time) อยู่ที่ 45 นาที และเวลาสุดท้ายของการเซตตัว (Final setting time) อยู่ที่ 375 นาที

จากตารางที่ 4.3 พบว่าในแต่ละสูตร ทั้ง สูตร A, B และ C สามารถบังคับเวลาเริ่มต้นการเซตตัว (Initial setting time) ให้เข้าใกล้ 90 นาที ได้ทั้งหมด 3 สูตรคือ สูตร A2, B1 และ C2 ซึ่งเวลาเริ่มต้นการเซตตัว (Initial setting time) นี้มีความสำคัญสำหรับการทำงานจริงมาก เพราะช่วงเวลานี้ ยังสามารถที่จะปรับแต่งหน้างานให้เรียบร้อยได้ เพราะถ้าหากเลยช่วงเวลานี้ไปแล้วการทำงานจะยากขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์จะเริ่มแข็งตัวมากขึ้น การปรับแต่งก็จะยากขึ้นตามไปด้วย

การปรับเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์นั้น สามารถปรับได้จากปริมาณน้ำและสารเคมีที่ใช้เช่น สารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) ซึ่งการจะปรับหรือกำหนดว่าต้องการเวลาเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการหน้างานเป็นสำคัญ

4.3 ผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลตัว

ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ ของไหลที่มีความหนืดสูง จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง และของไหลที่มีความหนืดต่ำ จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ เนื่องจากความหนืดเป็นลักษณะเฉพาะตัวของของไหลแต่ละชนิด การวัดค่าความหนืดจึงเป็นการหาพฤติกรรมการไหลตัวของของไหล พฤติกรรมการไหลตัวจะบอกคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลได้

การหาพฤติกรรมการไหลตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์นั้น ทำให้สามารถทำนายได้ว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีลักษณะการไหลอย่างไรเพื่อเลือกให้เหมาะกับการใช้งาน ซึ่งปูนซีเมนต์สำหรับปรับระดับพื้นนั้น ต้องมีความสามารถที่จะไหลตัวได้ดีด้วยตัวเอง สามารถเติมเต็มซอกมุมต่างๆได้ ซึ่งความสามารถไหลตัวได้เองนี้ จะเรียกว่ามีพฤติกรรมแบบนอน-นิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) ชนิดของไหลไดลาแตนต์ (Dilatant fluids) การที่เกิดลักษณะการไหลประเภทนี้เป็นเพราะภายในของไหลมีขนาดของอนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ซึ่งทำให้ในระหว่างช่วงการไหลเกิดลักษณะไม่ราบรื่น ซึ่งของไหลไดลาแตนต์ (Dilatant fluids) จะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ลักษณะการไหลประเภทนี้ยังมีชื่อเรียกอื่นๆ อีก เช่น Shear-thickening และ Power law liquid

ได้ทำการทดสอบหาพฤติกรรมการไหลตัวของ Neat cement pastes จากการวัดด้วยเครื่อง Brookfield แล้วเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และ shear rate แล้วจึงนำมาหาค่าตามกฎของ power law ดังสมการที่ 4.1⁽¹⁵⁾

$$y = kx^n \quad (4.1)$$

$$\text{โดยที่ } \tau = k(r^o)^n$$

$$\tau = \text{Shear stress, } r^o = \text{Shear rate, } n = \text{Power law index}$$

ซึ่งถ้าหาก ค่า n มีค่าเท่ากับ 1 ของไหลจะมีลักษณะเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) และถ้า n มีค่าน้อยกว่า 1 ของไหลจะมีลักษณะเป็นแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) หรือ Shear-thinning แต่ถ้า n มีค่ามากกว่า 1 ของไหลจะมีลักษณะเป็นแบบไดลาแตนต์ (Dilatant fluids) หรือ Shear-thickening

จากตารางจะพบว่า สูตร A2, B1 และ C2 มี ค่า Spread test และค่า Setting time ที่เหมาะสมกว่าสูตรอื่น จึงได้เลือกทั้ง 3 สูตรนี้ไปทำการทดลองหาพฤติกรรมการไหลตัว โดยได้อ้างอิงวิธีการทดลองจาก Nanthagopalan, P. และคณะ⁽¹⁶⁾ ซึ่งใช้วิธีวัดตัวอย่างแบบ Small sample volume ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

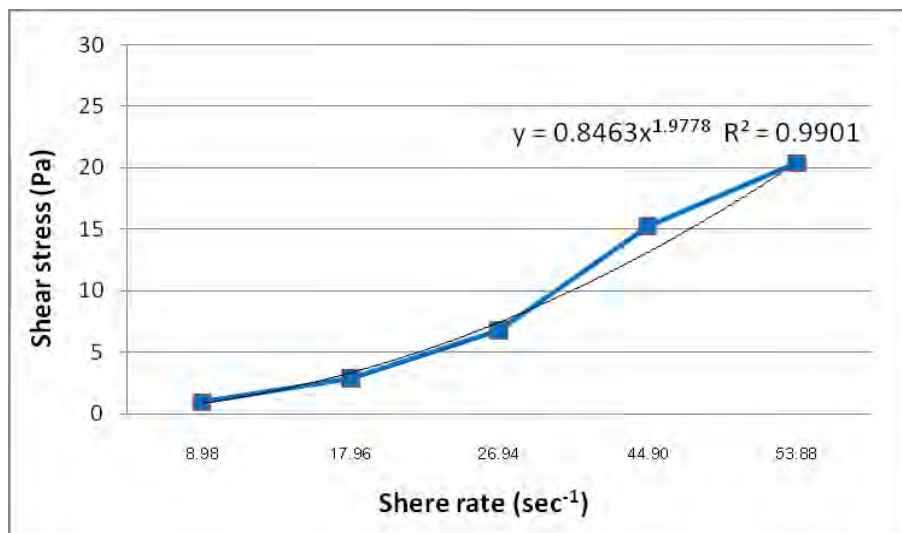
สูตร A2

ตารางที่ 4.4 สมบัติการไหลของสูตร A2 ที่วัดได้จากเครื่อง Brookfield

rpm	cp	torgue	Shear Rate (S',sec ⁻¹)	แปลงค่า torgue (X)	Shear Stress (F',Pa)
10	-	-1.2	8.98	-86.24	-0.56
20	197	8	17.96	574.96	3.71
30	290	17.4	26.94	1250.54	8.06
50	366	36.5	44.9	2623.26	16.91
60	362	44	53.88	3162.28	20.38
50	331	33	44.90	2371.71	15.29
30	243	14.6	26.94	1049.30	6.76
20	155	6.2	17.96	445.59	2.87
10	-	-2	8.98	-143.74	-0.93

หมายเหตุ: ค่า torgue ที่อ่านได้จากเครื่อง Brookfield (RV Model) ต้องทำการแปลงค่าที่อ่านได้

ให้เป็น full-scale torgue โดยคูณกับ 7187.0/100 หน่วย dyne-cm. ⁽¹⁵⁾ $\left(\frac{\text{torgue} \times 7187.0}{100} \right)$

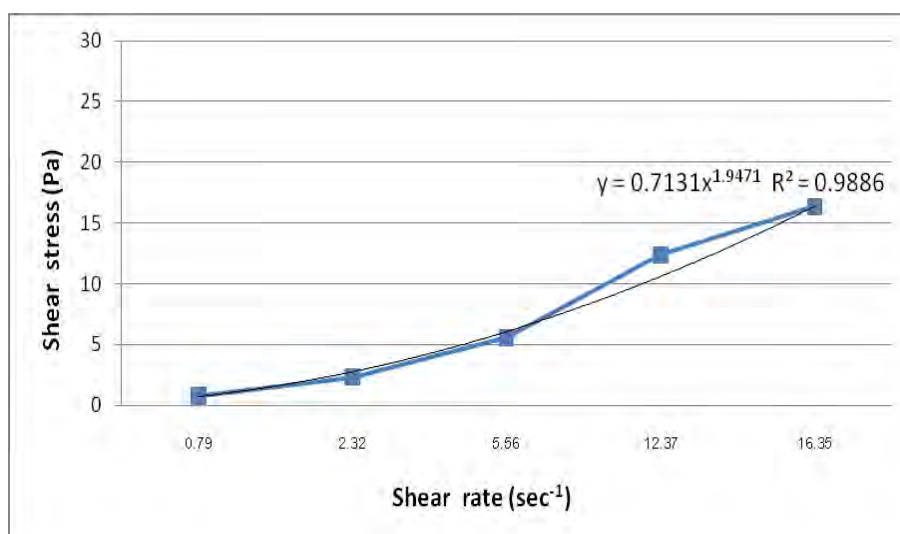


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และค่า shear rate ของสูตร A2

สูตร B1

ตารางที่ 4.5 สมบัติการไหลของสูตร B1 ที่วัดได้จากเครื่อง Brookfield

rpm	cp	torgue	Shear Rate (S',sec ⁻¹)	แปลงค่า torgue (X)	Shear Stress (F',Pa)
10	-	-0.6	8.98	-43.12	-0.28
20	172	6.8	17.96	488.72	3.15
30	238.3	14.3	26.94	1027.74	6.62
50	292	29.2	44.9	2098.60	13.53
60	295	35.3	53.88	2537.01	16.35
50	267	26.7	44.90	1918.93	12.37
30	200	12	26.94	862.44	5.56
20	125	5	17.96	359.35	2.32
10	-	-1.7	8.98	-122.18	-0.79

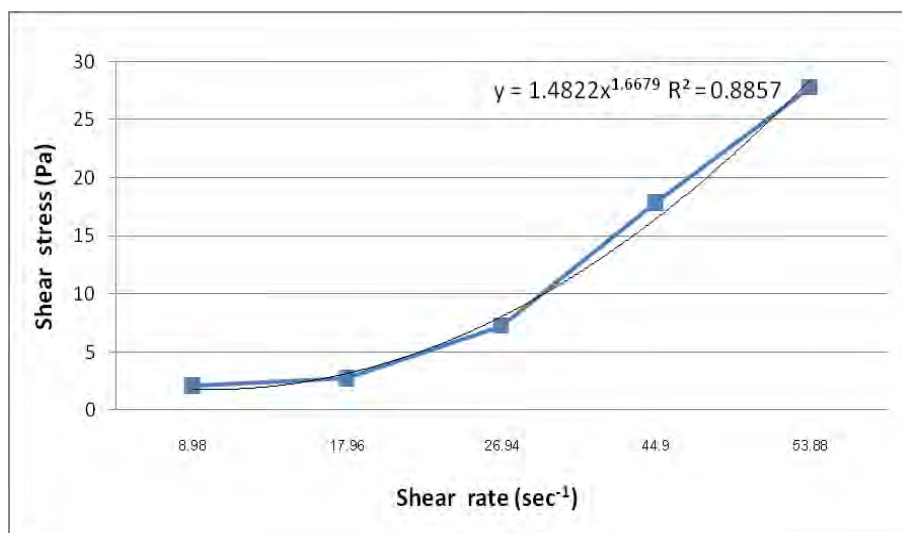


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และค่า shear rate ของสูตร B1

สูตร C2

ตารางที่ 4.6 สมบัติการไหลของสูตร C2 ที่วัดได้จากเครื่อง brookfield

rpm	cp	torgue	Shear Rate (S',sec ⁻¹)	แปลงค่า torgue (X)	Shear Stress (F',Pa)
10	-	-2	8.98	-143.74	-0.93
20	255	10.2	17.96	733.07	4.72
30	393.3	23.6	26.94	1696.13	10.93
50	492	48.5	44.9	3485.70	22.47
60	515.2	60	53.88	4312.20	27.79
50	388.2	38.6	44.90	2774.18	17.88
30	261.7	15.7	26.94	1128.36	7.27
20	147.5	5.9	17.96	424.03	2.73
10	-	-4.6	8.98	-330.60	-2.13



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress และค่า shear rate ของสูตร C2

จากสมการตามกฎของ Power Law : $y = ax^n$ พบว่า ค่า n ของทุกสูตรปูนซีเมนต์ มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งอธิบายได้ว่าปูนซีเมนต์มีพฤติกรรมการไหลตัวเป็นของไหลไดลาแทนท์ (Dilatant fluids) หรือ Shear-thickening ที่มี yield stress น้อยมาก(ภาคผนวก ง) หมายความว่า เมื่อทำ

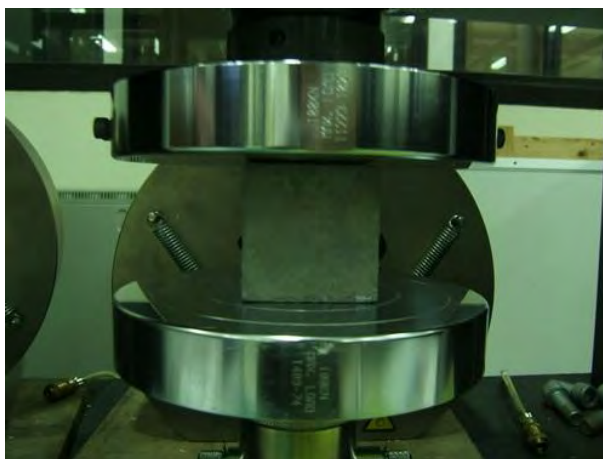
การเทออกไปแล้วปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จะไหลตัวได้ดีและยังคงสามารถไหลตัวได้อีกระยะหนึ่งคือมีลักษณะการไหลตัวที่ดี

4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

จากการนำปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ไปหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาด 5x5x5 เซนติเมตรแล้วนำไปทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องวัด Compressive strength รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท INSTRON ดังรูปที่ 4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน มีความแข็งแรงดังแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

จากมาตรฐาน ASTM C150-05⁽²¹⁾ ได้กำหนดค่าความแข็งแรง (Compressive strength) ของปูนที่อายุการบ่ม 7 วันและ 28 วัน จะมีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 19 MPa และ 28 MPa ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ มีค่าความแข็งแรงมากกว่าที่มาตรฐาน ASTM C150-05 กำหนด ยกเว้นสูตร A ที่อายุการบ่ม 7 วันเพียงสูตรเดียว

สาเหตุที่ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบมีความแข็งแรงสูงนั้น เนื่องจากการพัฒนาความแข็งแรงในปูนซีเมนต์ได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง C_3S , C_2S กับน้ำ ซึ่ง C_3S , C_2S นี้จะมีอยู่มากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 รูปขณะทดสอบความแข็งแรง (Compressive strength)

ตารางที่ 4.7 ความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ 7 วัน

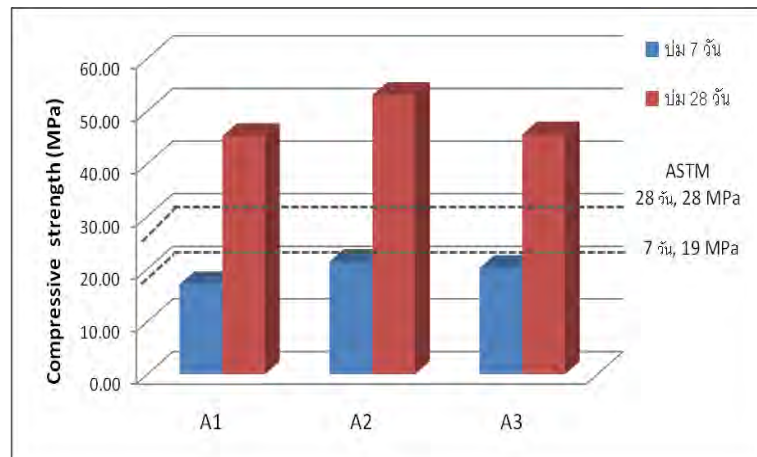
Mix	Compressive strength 7 day (MPa)					AV.	STDV.
	1	2	3	4	5		
A1	17.92	16.42	2.33	16.21	20.55	17.08	2.33
A2	20.33	23.13	5.10	26.60	13.17	21.38	5.10
A3	20.23	20.57	1.99	18.59	23.22	20.16	1.99
B1	44.64	45.68	1.79	45.41	47.87	45.31	1.79
B2	49.47	53.99	2.36	-	-	52.12	2.36
B3	40.29	47.01	3.85	-	-	44.73	3.85
C1	41.88	48.95	4.75	-	-	43.59	4.75
C2	46.87	42.69	3.00	-	-	46.02	3.00
C3	43.79	43.00	1.40	-	-	42.62	1.40

ตารางที่ 4.8 ความแข็งแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ 28 วัน

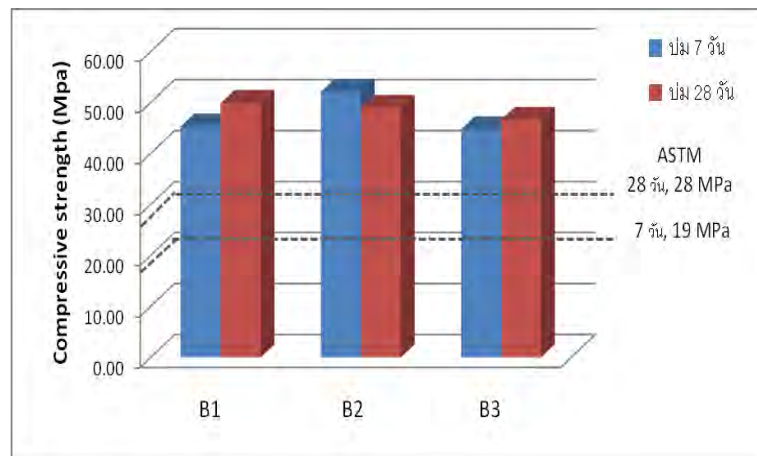
Mix	Compressive strength 28 day (MPa)					AV.	STDV.
	1	2	3	4	5		
A1	41.43	40.98	44.84	49.93	49.19	45.27	4.20
A2	53.03	>54	>54	>54	>54	53.03	-
A3	49.98	39.98	37.04	43.71	57.23	45.59	8.11
B1	55.66	50.96	46.06	53.12	43.71	49.90	4.94
B2	54.68	44.68	47.43	-	-	48.93	5.17
B3	47.24	47.63	44.96	-	-	46.61	1.44
C1	52.60	50.84	51.10	-	-	51.51	0.95
C2	44.22	53.94	53.01	-	-	50.39	5.36
C3	69.58	48.02	71.34	-	-	62.98	12.99

หมายเหตุ: 1. สูตร A2 ตัวอย่างที่ 2-4 ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากเครื่องสามารถวัดค่าได้สูงสุดที่ 54 MPa

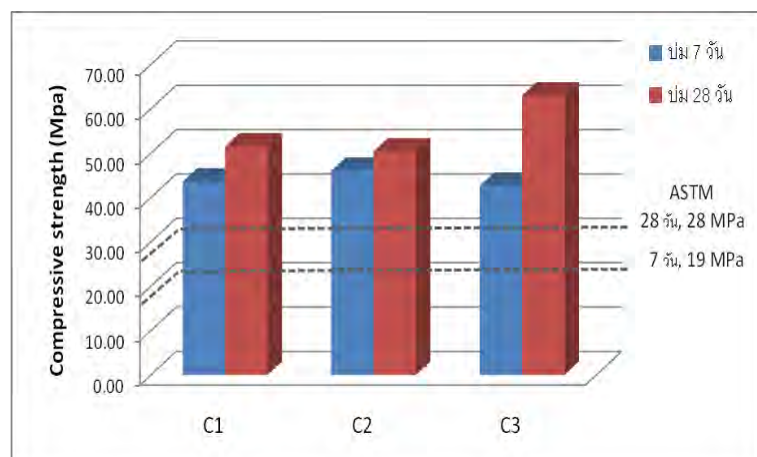
2. สูตร B2-C3 ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 3 ตัวอย่างเนื่องจากได้นำ อีก 2 ตัวอย่างไปทดสอบในตู้อบความชื้น และทดสอบด้วยเครื่อง Amster Machine (20 Ton.)



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงสูตร A ระหว่างการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงสูตร B ระหว่างการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงสูตร C ระหว่างการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน

โดยทั่วไปแล้วค่า compressive strength ไม่สามารถนำมาใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพราะอาจขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้อีก เช่น มวลรวม (Aggregate), ส่วนผสมคอนกรีตและสภาพแวดล้อมต่างๆ⁽²²⁾

4.5 ผลการทดสอบการหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

ได้ทำการหล่อปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ในโมลด์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³ การหดตัวหาได้โดยคำนวณค่า % การหดตัวจากขนาดหลังจากเวลาผ่านไป 1 วัน, 3 วันและ 7 วัน

เปอร์เซ็นต์การหด/ขยายตัวของสูตร A

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A หลัง 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน

ตัวอย่างที่	% การหดตัวหลัง 1 วัน				% การหดตัว หลัง 3 วัน				% การหดตัว หลัง 7 วัน			
1	0.00	-0.10	0.20	0.20	0.00	-0.49	0.20	0.20	-0.10	-0.49	0.20	-0.78
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00	-0.20
3	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.00	-0.10	0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.10	-0.10
4	-0.10	0.00	0.00	-0.21	-0.10	0.00	-0.20	-0.31	-0.10	0.00	-0.40	-0.21
5	-0.10	0.00	0.00	-0.20	-0.10	0.00	0.00	-0.20	-0.10	0.00	0.00	-0.20
6	-0.10	-0.20	0.00	0.00	-0.10	-0.20	0.00	0.00	-0.10	0.20	0.00	0.00
เฉลี่ย	-0.07	-0.07	0.02	-0.05	-0.05	-0.13	0.02	-0.07	-0.08	-0.08	-0.02	-0.25

เปอร์เซ็นต์การหด/ขยายตัวของสูตร B

ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B หลัง 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน

ตัวอย่างที่	% การหดตัวหลัง 1 วัน				% การหดตัว หลัง 3 วัน				% การหดตัว หลัง 7 วัน			
1	-0.30	-0.69	0.00	0.00	-0.40	-0.69	-0.20	-0.20	-0.40	-0.59	0.00	-0.20
2	-0.20	-0.40	-0.40	0.00	-0.20	-0.20	-0.40	-0.20	-0.40	-0.40	-0.40	-0.20
3	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.10	-0.20	-0.30	-0.30	-0.10	-0.20
4	-0.20	-0.41	-0.79	-0.21	-0.39	-0.41	-0.60	-0.62	-0.20	-0.41	-0.60	-0.62
5	-0.10	-0.20	-0.30	-0.40	-0.20	0.00	-0.30	-0.20	-0.30	0.00	-0.40	-0.20
6	-0.30	-0.40	-0.30	0.00	-0.20	-0.40	-0.20	-0.20	-0.30	-0.40	-0.30	-0.20
เฉลี่ย	-0.23	-0.40	-0.35	-0.15	-0.28	-0.33	-0.30	-0.27	-0.32	-0.35	-0.30	-0.27

หมายเหตุ : - หมายถึง การขยายตัว
+ หมายถึง การหดตัว

เปอร์เซ็นต์การหด/ขยายตัวของสูตร C

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C หลัง 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน

ตัวอย่างที่	% การหดตัวหลัง 1 วัน				% การหดตัว หลัง 3 วัน				% การหดตัว หลัง 7 วัน			
1	-0.81	-1.09	-0.40	-0.59	-1.01	-1.18	-0.50	-0.78	-1.01	-1.18	-0.50	-0.78
2	-0.60	-0.59	-0.70	-0.60	-0.80	-0.79	-0.80	-0.89	-1.00	-0.99	-1.00	-0.99
3	-0.70	-0.51	-0.50	-0.51	-1.01	-0.71	-0.80	-0.71	-1.11	-0.91	-0.90	-0.91
4	-0.59	-0.41	-0.99	-0.62	-0.89	-0.61	-1.19	-0.82	-0.99	-0.82	-1.39	-1.03
5	-0.69	-0.50	-0.60	-0.81	-0.69	-0.60	-0.79	-0.81	-0.69	-0.81	-0.89	-1.21
6	-0.49	-1.10	-0.49	-0.40	-0.69	-1.10	-0.69	-0.60	-0.89	-1.20	-1.08	-1.00
เฉลี่ย	-0.65	-0.70	-0.61	-0.59	-0.85	-0.83	-0.80	-0.77	-0.95	-0.99	-0.96	-0.99

หมายเหตุ : - หมายถึง การขยายตัว
+ หมายถึง การหดตัว

จากเปอร์เซ็นต์การหด/ขยายตัวที่คำนวณได้ พบว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรที่ทำการทดลอง ทั้ง 3 สูตรส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัวมากกว่า ซึ่งการหดตัวพบได้น้อยมาก (เฉพาะในสูตร A) ซึ่งอธิบายได้ว่า การขยายตัวจะมากขึ้นเมื่อปริมาณของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น (แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ลดลง) แต่การขยายตัวที่เกิดขึ้นไม่มีความรุนแรงเนื่องจากอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวที่ต่ำ ~ 1%

การขยายตัวที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะเกิดจาก Ettingite ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ที่มีอยู่ โดยเฉพาะในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีระบบซีเมนต์เป็นแบบ Aluminous cement – Portland cement – Anhydrite System จะเกิดการหดตัว-ขยายตัว-หดตัว โดยจะเริ่มเกิดตั้งแต่เริ่มการเซ็ตตัว และการขยายตัวหลังจาก Final setting จะเห็นได้ชัดเจนขึ้น โดยทั่วไปแล้ว Ettingite (ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาจาก C_3A กับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และน้ำ) จะทำให้เกิดการขยายตัว และถ้าหากมี Portlandite (เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S) กับน้ำ) อยู่ร่วมด้วยแล้ว จะทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่ 2OH^- ที่ได้จาก Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีปริมาณมาก ไปแทนที่ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งจะนำไปสู่การขยายตัวที่เพิ่มมากขึ้น⁽²³⁾

และสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ambroise J. และคณะ⁽²⁴⁾ ที่พบว่าในระบบปูนซีเมนต์แบบ OPC-CAC-C\$ เมื่อทำการบ่มปูนในน้ำ จะเกิดการบวมอย่างรวดเร็ว (ที่ 1 วันหลังถอดแบบ) จนถึงระดับหนึ่ง จากนั้นก็จะค่อนข้างคงตัวไปจนถึง 28 วัน⁽²⁴⁾

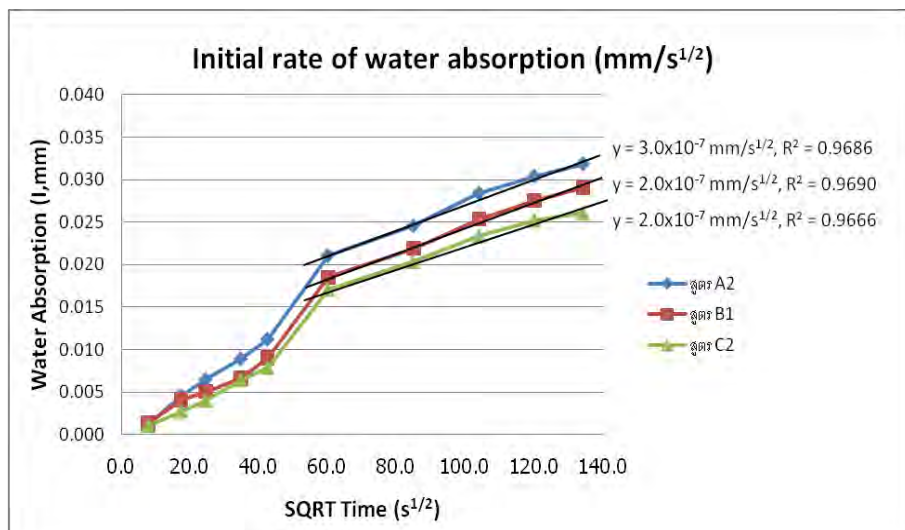
4.6 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์

อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) สามารถหาได้จากความชัน (Slope) ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption, I) กับค่าสแควร์รูทของเวลา โดยใช้ช่วงเวลา 1 นาทีจนถึง 6 ชั่วโมง

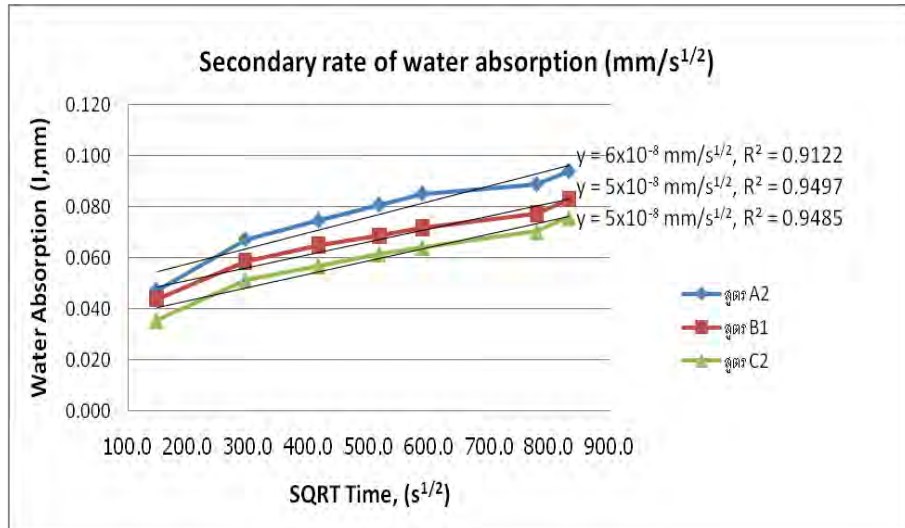
ส่วนอัตราการดูดซึมน้ำช่วงที่ 2 (Secondary Rate of Water Absorption) ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) แต่ใช้ช่วงเวลาจาก 1 วันจนถึง 7 วัน

จากนั้นได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ทั้งหมด 3 สูตรด้วยกัน โดยอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้นและอัตราการดูดซึมน้ำช่วงที่ 2 สำหรับสูตร A, B และ C แสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ จากอัตราการดูดซึมน้ำได้แสดงให้เห็นว่าจะมีอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate) ที่สูงในระยะ 6 ชั่วโมงแรก เนื่องจากปูนซีเมนต์ยังแห้งอยู่ จากนั้นพอเข้าสู่ช่วงที่ 2 (Secondary Rate) อัตราการดูดซึมน้ำจะลดลงเนื่องจากเข้าสู่ช่วงการอิ่มตัว โดยดูได้จากกราฟในรูปที่ 4.11 นั้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น น้ำจะเข้าไปแทนที่รูพรุนในซีเมนต์และทำให้อัตราการดูดซึมน้ำลดลง และพบว่า สูตร A จะมีอัตราการดูดซึมน้ำมากที่สุดจากทั้ง 3 สูตร

การดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์นี้ มีความสัมพันธ์กันรูพรุนในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ โดยสูตรปูนซีเมนต์ที่ใช้ น้ำในการทำปฏิกิริยาสูง (w/c) จะเกิดรูพรุนในโครงสร้างจำนวนมากทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น



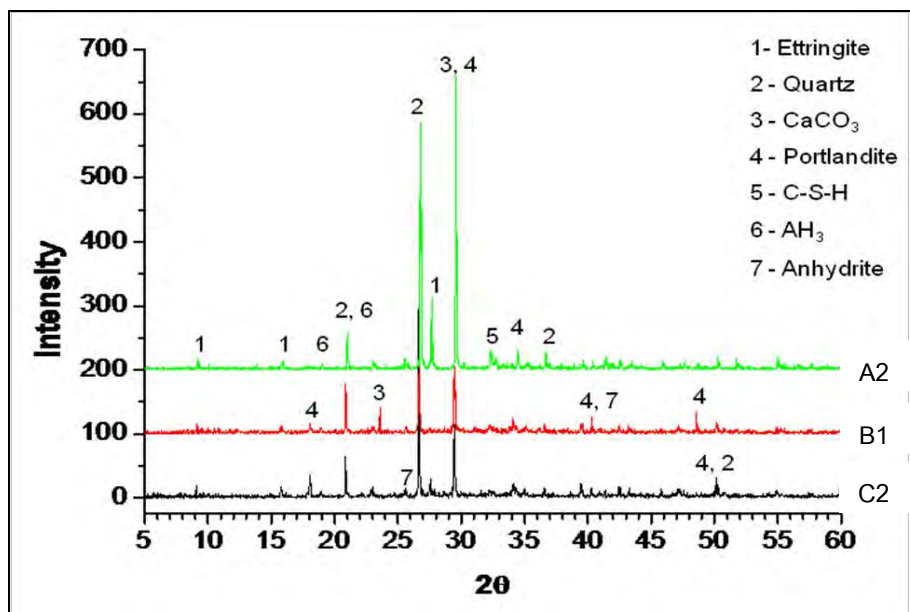
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Water Absorption(I) กับ Square root of Time, วัดค่าในช่วงระหว่าง 1 นาทีถึง 6 ชั่วโมง (Initial rate)



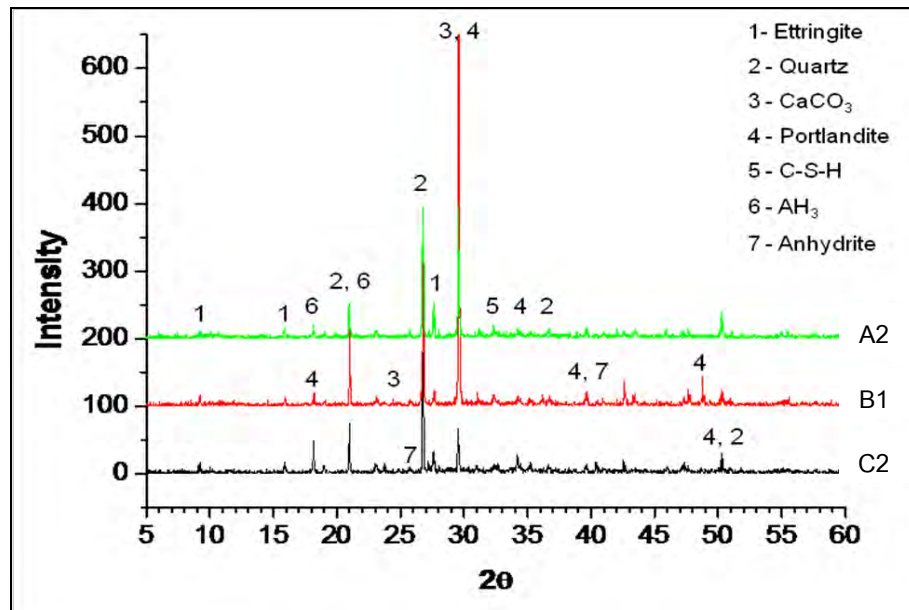
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Water Absorption(l) กับ Square root of Time, วัดค่าในช่วงระหว่าง 1 วันถึง 7 วัน (Secondary rate)

4.7 ผลการตรวจสอบเฟสของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วย XRD

รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบทางเฟสของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน พบว่าเฟสหลักที่พบเป็นของควอตซ์ (SiO_2 , JCPDS 01-078-1254) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 , JCPDS 01-070-0095) ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด, Ettringite ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, JCPDS 00-041-1451) และ Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, JCPDS 01-001-1079) และที่พบเป็นส่วนน้อยก็คือ Anhydrite (CaSO_4 , JCPDS 01-074-2421), Gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$, JCPDS 01-070-2038) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH, JCPDS 01-078-1254)



รูปที่ 4.12 เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.13 เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

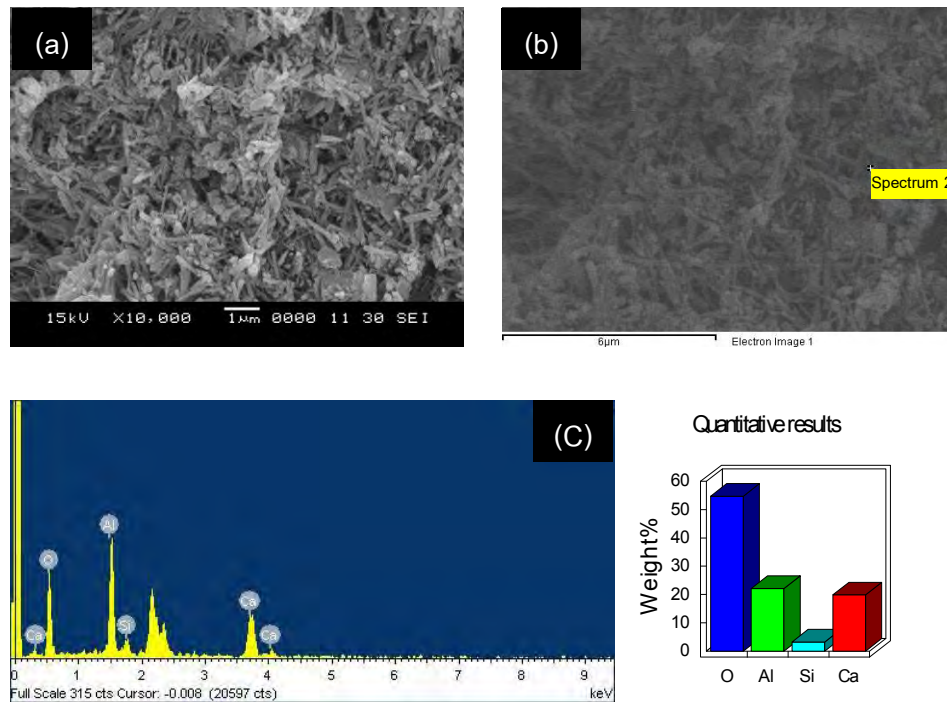
สาเหตุที่พบควอตซ์ (SiO_2) เป็นปริมาณมากเนื่องจากว่า ได้ใส่ทรายลงไปในส่วนผสมมากถึง 40% ซึ่งทรายเป็นส่วนผสมที่ไม่ละลายน้ำและมีขนาดอนุภาคใหญ่จึงยังคงเหลือในปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วอยู่มาก เช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สูตรปูนนี้ส่วนผสมหลักคือปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ซึ่งจะมีสารประกอบหลักคือแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S) เมื่อผสมน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเปลี่ยนไปเป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่ง Portlandite จะเกิดขึ้นประมาณ 15-25%⁽²⁵⁾ เมื่อผ่านการบ่ม Portlandite จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่อยู่ในน้ำ เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ได้ที่ผิวและสำหรับ Ettringite ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) เกิดจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ทำปฏิกิริยากับซัลเฟต (Sulfate) ที่มาจากแอนไฮไดรท์ (CaSO_4) และน้ำเกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ Ettringite

4.8 ผลการตรวจสอบปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วย SEM

4.8.1 ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร A2

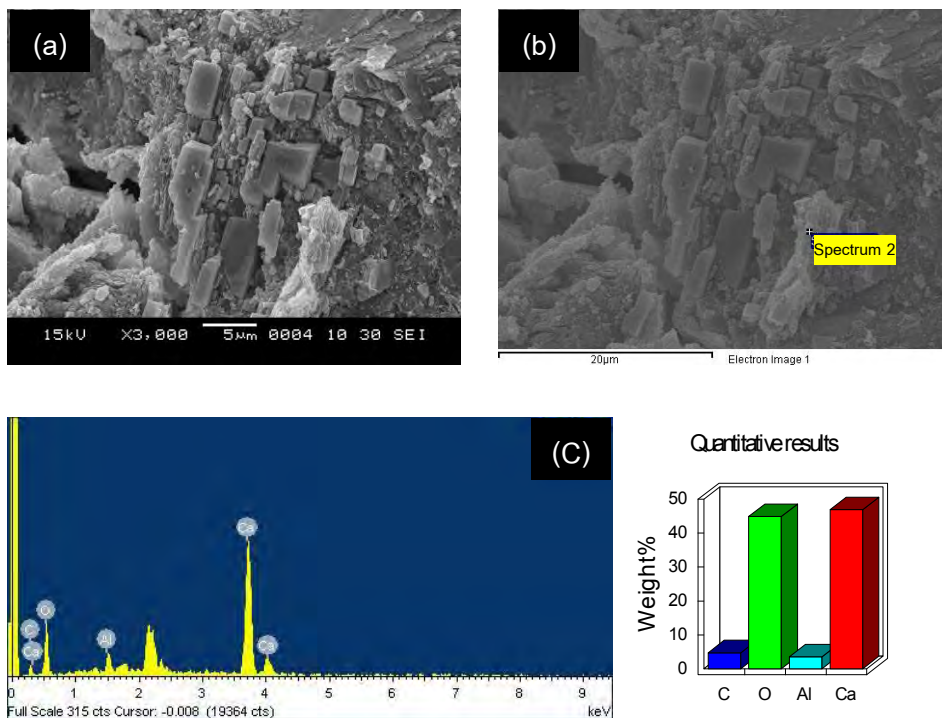
ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร A2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีองค์ประกอบทางเคมีสามารถยืนยันได้ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุ O, Al, Si และ Ca ซึ่งคาดว่าเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และจากผลึกที่เกิดขึ้นในรูป (a) เป็นการสานตัวกันของผลึกรูปเข็มคาด

ว่าน่าจะเกิด Ettringite ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{SO}_3\cdot32\text{H}_2\text{O}$) แต่จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS ปรากฏว่ามี Peak ของซัลเฟอร์ปรากฏที่สเกล 2.3



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

ส่วนผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร A2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตรวจสอบพบธาตุ C, O, Al และ Ca และปรากฏสเปกตรัมของซิลิกา (Si) และซัลเฟอร์ ที่สเกล 1.7 และ 2.3 ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และ Ettringite เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน จากภาพ SEM ได้พบว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้พบแคลเซียมเป็นผลึกแบบ Rhombohedral, Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ CaCO_3 ดังรูปที่ 4.15

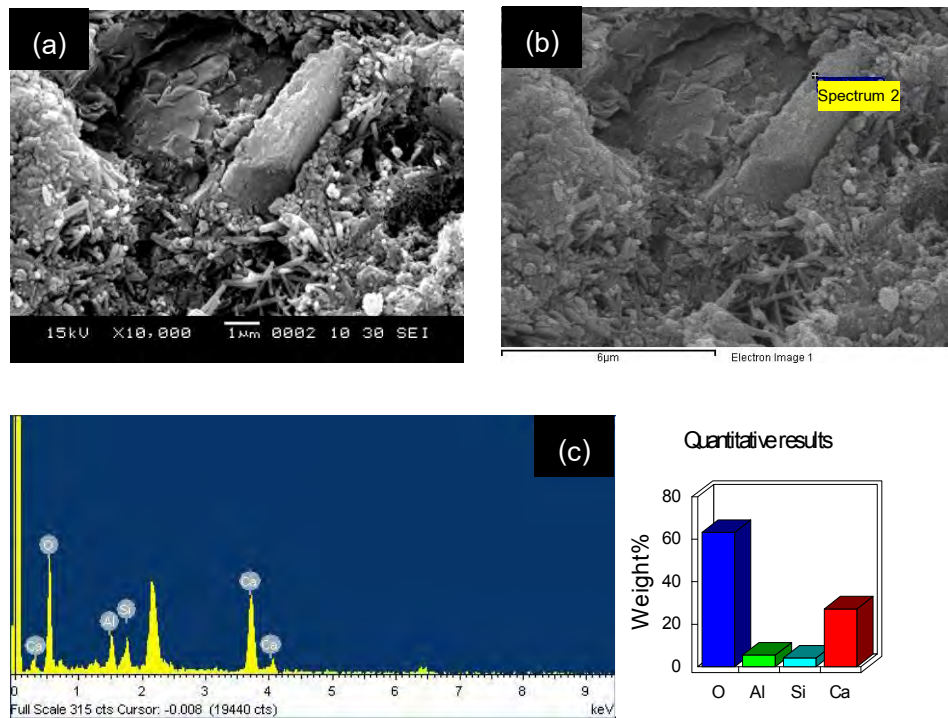


รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

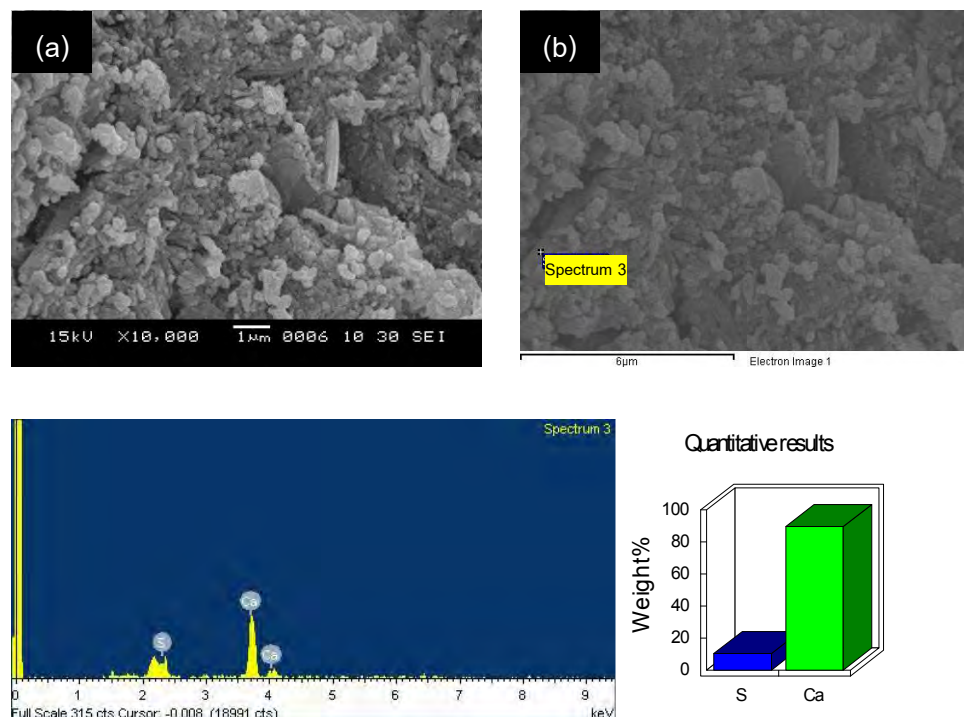
4.8.2 ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร B1

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร B1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีองค์ประกอบทางเคมีสามารถยืนยันได้ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุ O, Al, Si และ Ca คาดว่าเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และพบการสานตัวกันเป็นผลึกรูปเข็มของ Ettringite ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 และในบริเวณที่ยังสเปกตรัมจะสังเกตเห็นเป็นรูปผลึกซึ่งคาดว่าเป็นรูปผลึกของ Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่มาจากการทำปฏิกิริยาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ส่วนผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร B1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้พบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ Ettringite และที่สเปกตรัม 3 ได้ตรวจสอบพบผลึกของแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

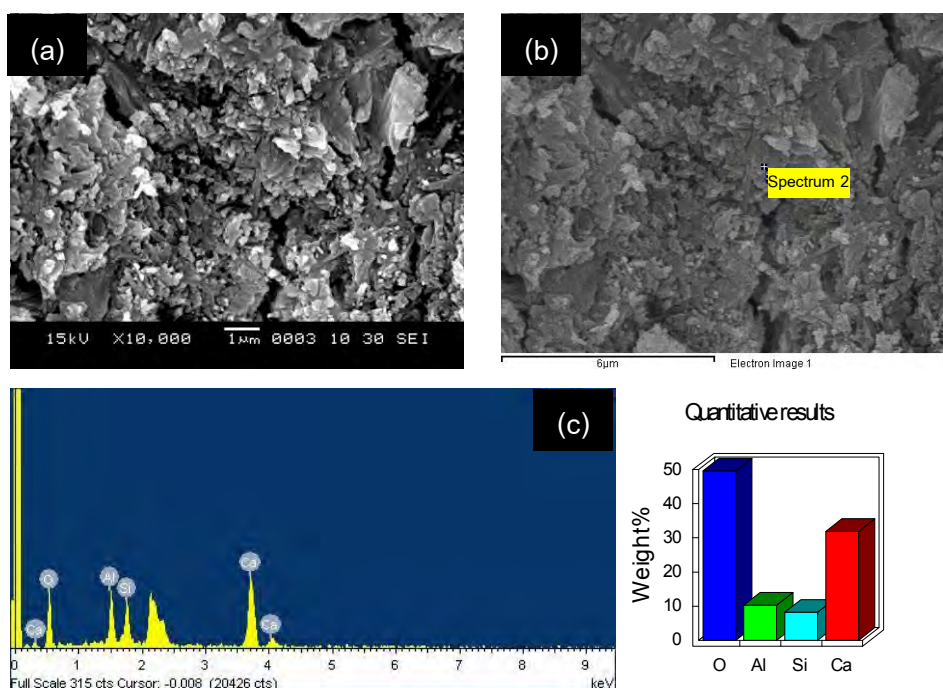


รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

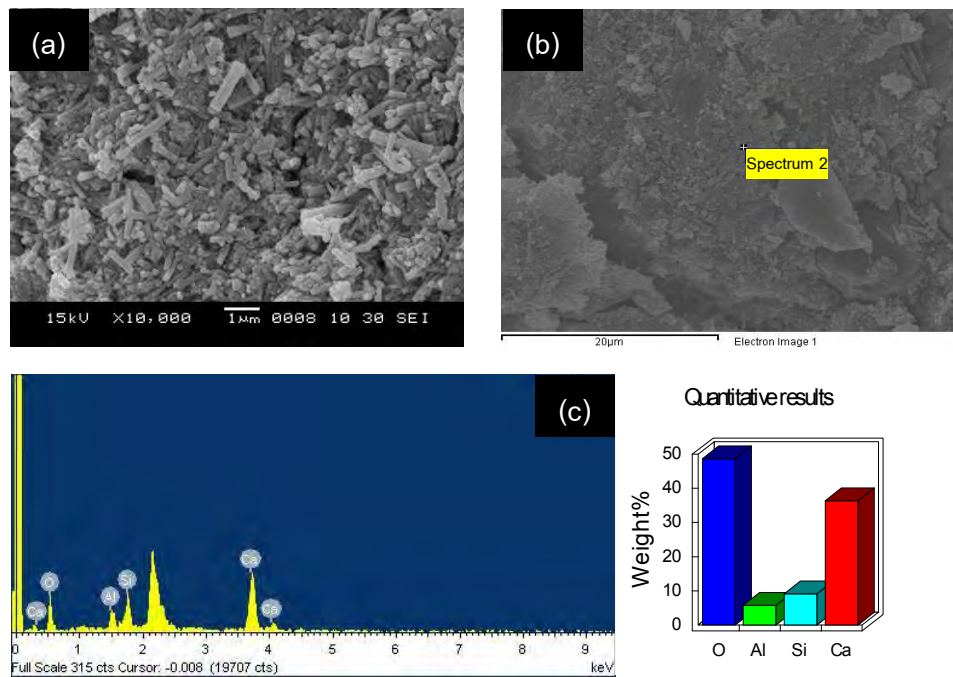
4.8.3 ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร C2

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีองค์ประกอบทางเคมีสามารถยืนยันได้ด้วยเทคนิค EDS ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุ O, Al, Si และ Ca คาดว่าเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และพบการสานตัวกันของผลึกรูปเข็มของ Ettringite ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{SO}_3\cdot32\text{H}_2\text{O}$) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 และสูตร B1

ส่วนผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ของสูตร C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้พบการสานตัวกันของผลึกรูปเข็มของ Ettringite กระจายอยู่โดยทั่วไป พร้อมตรวจพบธาตุ O, Al, Si และ Ca ซึ่งคาดว่าเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C2 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน, (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการการพัฒนาปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับปูพื้นที่ปรับระดับได้ด้วยตัวเอง เพื่อต้องการที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของปูนปูพื้นให้มีความสามารถในการใช้งาน เช่น การไหลตัว เวลาในการเซ็ตตัว มีความแข็งแรงที่ดีและมีการหดตัวต่ำเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักเมื่อปูนแข็งตัว สรุปได้ดังนี้

1. ความสามารถในการใช้งาน (Workability) เช่น การไหลตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับสารปรับการไหลตัวและปริมาณของน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเป็นหลัก จากสูตรปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปรับระดับพื้นที่ทำการทดลองพบว่า ไม่ควรใส่ปริมาณสารปรับการไหลตัวเกิน 1.2 % (wt/cement) และไม่ควรรี้น้ำเกิน 0.22 wt% โดยสังเกตได้จากค่า Slump Test ถ้าหากมีความกว้างเส้นผ่าศูนย์กลาง (D1,D2) มากกว่า 400 mm ขึ้นไป ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์จะเริ่มเกิดการเยิ้ม (Bleeding) และเกิดการแยกตัว (Segregation) ระหว่างส่วนผสมและเนื้อปูนซีเมนต์

2. เวลาในการเซ็ตตัว (Setting time) พบว่ามีความสัมพันธ์ขึ้นกับปริมาณน้ำและสารปรับการไหลตัว ถ้าหากในสูตรส่วนผสมมีปริมาณน้ำและสารปรับการไหลตัวที่มาก จะทำให้เวลาในการเซ็ตตัวขยายออกไป แต่ทั้งนี้สามารถปรับเวลาการเซ็ตตัวให้เร็วขึ้นหรือช้าลงได้และมีความเหมาะสมกับการทำงานจริงได้ด้วยสารเร่งปฏิกิริยาและสารหน่วงปฏิกิริยา

3. ความแข็งแรง (Compressive strength) ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมในระบบ OPC-CAC-C\$ หลังผ่านการบ่มที่ 7 วันมีความแข็งแรงสูงสุดวัดได้ถึง 52.12 MPa (สูตร B) และหลังผ่านการบ่มที่ 28 วัน มีความแข็งแรงสูงสุดวัดได้ถึง 62.98 MPa (สูตร C) ซึ่งความแข็งแรงนี้เกินกว่าความต้องการใช้งานสำหรับปูนปูพื้น และพบว่ามีค่าการขยายตัวอยู่ในระดับต่ำ ไม่เกิน 1% ซึ่งใกล้เคียงกับปูนปูพื้นปรับระดับที่มีในทางการค้า

4. อัตราการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่า Initial rate of water absorption ประมาณ 2×10^{-7} mm/s^{1/2} และค่า Secondary rate of water absorption ประมาณ 5×10^{-8} mm/s^{1/2} ซึ่งมีอัตราการดูดซึมน้ำน้อยกว่า Normal concrete โดยที่ Normal concrete⁽¹⁸⁾ มี Initial rate of water absorption และ Secondary rate of water absorption ประมาณ 215×10^{-4} mm/s^{1/2} และ 4×10^{-4} mm/s^{1/2} ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปรับระดับพื้น เพิ่มเติมในเรื่องของการทำงานจริงโดยทดลองด้วยการนำไปเทบนพื้นจริงในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อดูว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ยังสามารถคงสมบัติได้เหมือนที่ทำการทดสอบในห้องทดลองหรือไม่ ทั้งในเรื่องของความสามารถในการทำงาน เวลาการเซ็ตตัวรวมถึงการหด/ขยายตัวและความแข็งแรงเป็นต้น

2. ความสามารถในการใช้งานของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปรับระดับพื้น ขึ้นอยู่กับสารปรับการไหลตัวเป็นหลัก ควรมีการทดสอบโดยใช้สารปรับการไหลตัวชนิดอื่นเช่น Lignosulfonate-based, Naphthalene-based หรือ Polycarboxylate ether (PCE) ชนิดอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งอาจลดต้นทุนได้

รายการอ้างอิง

- (1) Emoto, T., and Bier, T. A. Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics. Cement and Concrete Research 37 (2007): 647-654.
- (2) Gasparo, A. D., Herwegh, M., Zurbruggen, R., and Scrivener, K. Quantitative distribution patterns of additives in self-leveling flooring compounds (underlayments) as function of application, formulation and climatic conditions Cement and Concrete Research 39 (2009): 313-323.
- (3) Calcium Aluminate Cements (CAC) – Phases and Structure of Calcium Aluminate Cements [Online]. Available from: <http://www.azom.com> [2010, july, 15]
- (4) ชัชวาล เศรษฐบุตตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง, 2536.
- (5) ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2549.
- (6) Hydration of Portland Cement[Online]. Available from : <http://cnx.org> [2010, july, 20]
- (7) Piwnil, T., and Nomsartkul, S. The Study of Problems and Requirements of Patent for Construction Industry in Thailand _Civil Technology King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok 2002.
- (8) Technical data sheets[Online]. Available from : <http://www.functionalpolymers.basf.com> [2010, August, 12]
- (9) Felekoglu, B. Optimization of self-compacting filling grout mixtures for repair purposes. Construction and Building Materials 22 (2008): 660-667.
- (10) Hanehara, S., and Yamada, K. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. Cement and Concrete Research 29 (1999): 1159-1165.
- (11) Şahmaran, M., Christianto, H. A., and Yaman, İ. Ö. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. Cement and Concrete Composites 28 (2006): 432-440.
- (12) ASTM, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, C1437-01,2008.

- (13) Eric, P. K., and David, W. f., Summary of Concrete Workability Test Methods, International Center for Aggregates Research The University of Texas at Austin, 2003, 59-60.
- (14) ASTM, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, C 191-04b, 2008.
- (15) More solutions to sticky problems. Brookfield Engineering Labs., Inc.,
- (16) Nanthagopalan, P., and Santhanam, M. A new empirical test method for the optimisation of viscosity modifying agent dosage in self-compacting concrete. Materials and Structures 43 (2010): 203-212.
- (17) ASTM, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, C 1585-04, 2009.
- (18) Byrami, M. Rate of absorption of water by litecrete lightweight concrete and normal concrete. Auckland uniservices limited, 2006.
- (19) Ransinchung, G. D., Kumar, B., and Kumar, V. Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica. Construction and Building Materials 23 (2009): 1168-1177.
- (20) ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), C 109/C 109M-05, 2009.
- (21) ASTM, Standard Specification for Portland Cement, C 150-05, 2009.
- (22) กิตติพงษ์ รักช่วย และสมชาย จิตต์วโรดม. พัฒนาผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยี(ซีเมนต์) ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม, 2545.
- (23) Hirano, Y., Makida, K., Komatsu, R., and Ikeda, K. Dimentional Change of Self-Leveling Materials Developed by Mixing Aluminous Cement, Portland Cement and Anhydrite. Calcium Aluminate Cement Proceedings of the Centenary Conference 2008. ISH BRE Press, 2008.
- (24) Ambroise, J., and Pera, J. Development of Self-Levelling Screed Based on Calcium Aluminate Cement. Calcium Aluminate Cement Proceedings of the Centenary Conference 2008. IHS BRE Press, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ขนาดโมลต์ที่ใช้หล่อปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

โมลต์ที่	ขนาด โมลต์ (mm.)			
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4
1	49.50	50.65	49.80	51.10
2	50.00	50.50	50.00	50.40
3	49.65	49.35	49.75	49.35
4	50.70	49.00	50.40	48.70
5	50.45	49.60	50.40	49.60
6	50.65	49.80	50.75	50.00

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข- 1 ขนาดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร A2 ที่วัดได้หลัง 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน

ตัวอย่าง ที่	สูตร A2											
	หลัง 1 วัน				หลัง 3 วัน				หลัง 7 วัน			
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4
1	49.50	50.70	49.70	51.00	49.50	50.90	49.70	51.00	49.55	50.90	49.70	51.50
2	50.00	50.50	50.00	50.40	50.00	50.50	50.00	50.40	50.00	50.55	50.00	50.50
3	49.70	49.40	49.80	49.40	49.65	49.40	49.70	49.40	49.70	49.40	49.70	49.40
4	50.75	49.00	50.40	48.80	50.75	49.00	50.50	48.85	50.75	49.00	50.60	48.80
5	50.50	49.60	50.40	49.70	50.50	49.60	50.40	49.70	50.50	49.60	50.40	49.70
6	50.70	49.90	50.75	50.00	50.70	49.90	50.75	50.00	50.70	49.70	50.75	50.00

ตารางที่ ข- 2 ขนาดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร B1 ที่วัดได้หลัง 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน

ตัวอย่าง ที่	สูตร B1											
	หลัง 1 วัน				หลัง 3 วัน				หลัง 7 วัน			
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4
1	49.65	51.00	49.80	51.10	49.70	51.00	49.90	51.20	49.70	50.95	49.80	51.20
2	50.10	50.70	50.20	50.40	50.10	50.60	50.20	50.50	50.20	50.70	50.20	50.50
3	49.80	49.50	49.90	49.50	49.80	49.50	49.80	49.45	49.80	49.50	49.80	49.45
4	50.80	49.20	50.80	48.80	50.90	49.20	50.70	49.00	50.80	49.20	50.70	49.00
5	50.50	49.70	50.55	49.80	50.55	49.60	50.55	49.70	50.60	49.60	50.60	49.70
6	50.80	50.00	50.90	50.00	50.75	50.00	50.85	50.10	50.80	50.00	50.90	50.10

ตารางที่ ข- 3 ขนาดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C ที่วัดได้หลัง 1 วัน, 2 วันและ 3 วัน

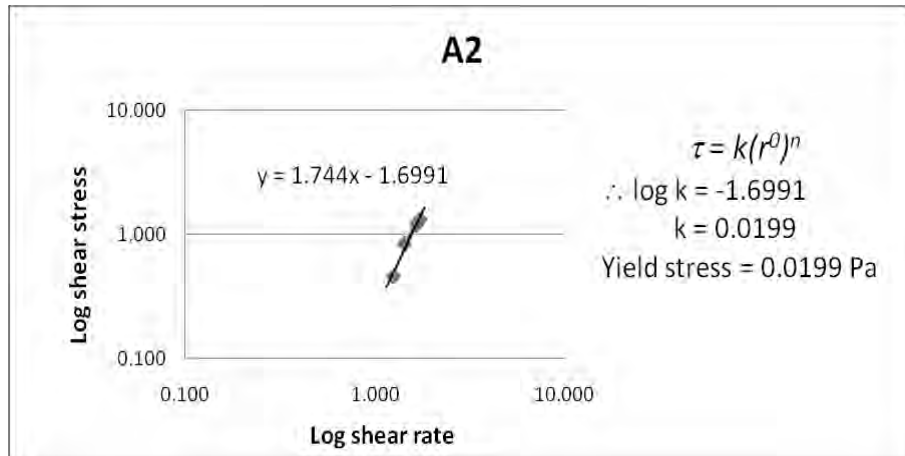
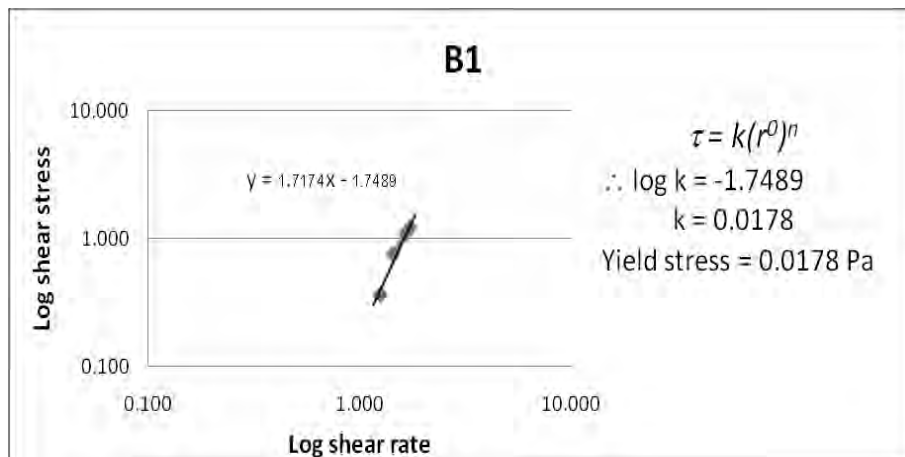
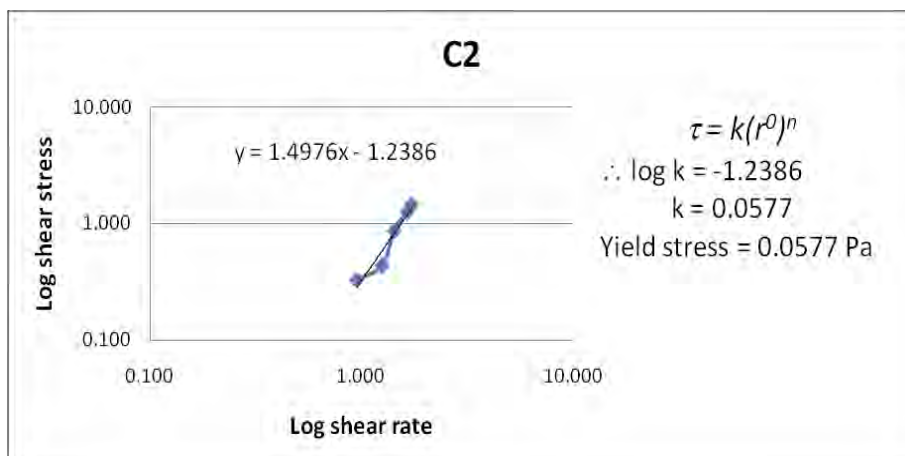
ตัวอย่างที่	สูตร C2N											
	หลัง 1 วัน				หลัง 3 วัน				หลัง 7 วัน			
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 3	ด้านที่ 4
1	49.90	51.20	50.00	51.40	50.00	51.25	50.05	51.50	50.00	51.25	50.05	51.50
2	50.30	50.80	50.35	50.70	50.40	50.90	50.40	50.85	50.50	51.00	50.50	50.90
3	50.00	49.60	50.00	49.60	50.15	49.70	50.15	49.70	50.20	49.80	50.20	49.80
4	51.00	49.20	50.90	49.00	51.15	49.30	51.00	49.10	51.20	49.40	51.10	49.20
5	50.80	49.85	50.70	50.00	50.80	49.90	50.80	50.00	50.80	50.00	50.85	50.20
6	50.90	50.35	51.00	50.20	51.00	50.35	51.10	50.30	51.10	50.40	51.30	50.50

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค- 1 การดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร A2, B1 และ C2

เวลา	สูตร A2 (g)	สูตร B1 (g)	สูตร C2 (g)
0 นาที	248.97	256.35	254.22
1 นาที	249.12	256.52	254.35
5 นาที	249.54	256.86	254.56
10 นาที	249.78	256.98	254.72
20 นาที	250.08	257.18	255.02
30 นาที	250.37	257.48	255.20
2 ชม.	251.60	258.66	256.35
3 ชม.	252.04	259.09	256.76
4 ชม.	252.52	259.52	257.14
5 ชม.	252.77	259.79	257.37
6 ชม.	252.95	259.98	257.48
1 วัน	254.89	261.85	258.66
2 วัน	257.38	263.70	260.66
3 วัน	258.31	264.48	261.34
4 วัน	259.08	264.94	261.93
5 วัน	259.62	265.35	262.26
6 วัน	260.08	266.02	263.03
7 วัน	260.72	266.74	263.72

ภาคผนวก ง

รูปที่ ง- 1 การหาค่า yield stress จากสูตร power law, $\tau = k(r^o)^n$ สูตร A2รูปที่ ง- 2 การหาค่า yield stress จากสูตร power law, $\tau = k(r^o)^n$ สูตร B1รูปที่ ง- 3 การหาค่า yield stress จากสูตร power law, $\tau = k(r^o)^n$ สูตร C2

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ-1 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ SiO_2 ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003

JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-078-1254

Pattern : 01-087-2096		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated			
$\alpha\text{-SiO}_2$		2θ	i	h	k	l	
Silicon Oxide Quartz low		20.862	216	1	0	0	
		26.644	999	0	1	1	
		36.552	60	1	1	0	
		39.473	59	1	0	2	
		40.298	26	1	1	1	
		42.459	43	2	0	0	
		45.803	24	2	0	1	
		50.149	96	1	1	2	
		50.629	3	0	0	3	
		54.884	26	0	2	2	
		55.335	11	0	1	3	
		57.243	2	2	1	0	
		59.971	58	1	2	1	
		64.046	10	1	1	3	
		65.799	3	3	0	0	
		67.756	32	1	2	2	
		68.155	41	2	0	3	
		68.327	42	0	3	1	
		73.479	11	1	0	4	
		75.674	14	3	0	2	
		77.686	7	2	2	0	
		79.898	14	2	1	3	
		80.059	8	2	2	1	
		81.185	12	1	1	4	
		81.506	14	3	1	0	
		83.854	8	1	3	1	
		84.969	1	2	0	4	
		87.091	1	2	2	2	
		87.462	1	3	0	3	
Lattice : Hexagonal S.G. : P3221 (154) a = 4.91270 c = 5.40450 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 112.96 Dx = 2.650 l/cor = 2.88					
ICSD collection code: 083849 ICSD space group comment: ICSD SG: P3221S IT is: 154 SG short form: P3221 Remarks from ICSD/CSD: REM RVP. Temperature factor: ITF Additional pattern: See PDF 78-2315. Data collection flag: Ambient.							
Norby, P., J. Appl. Crystallogr., volume 30, page 21 (1997) Calculated from ICSD using POWD-12++							
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F29=1000(0.0001,29)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings					

ตารางที่ ๑-2 แสดงค่า 2θ, intensity และ hkl ของ CaCO₃ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-070-0095

Pattern : 01-070-0095		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
CaCO ₃		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Calcium Carbonate		14.685	16	1	0	0	70.611	7	3	1	3
		21.374	1	0	1	1	*70.611	7	1	1	5
		23.240	77	1	1	0	70.798	18	-4	2	2
		*23.240	77	0	0	2	*70.798	18	-2	0	6
		23.399	23	-1	0	2	70.944	9	-4	2	1
		23.881	4	-1	1	1	*70.944	9	-2	2	5
		28.028	4	1	1	1	72.494	2	1	3	3
		29.624	999	2	0	0	72.639	1	0	2	5
		*29.624	999	-1	1	2	*72.639	1	-3	3	1
		31.303	6	1	0	2	73.230	3	2	3	2
		31.632	20	-2	0	2	73.533	18	4	2	0
		33.672	1	-2	1	1	*73.533	18	-1	1	6
		34.828	19	2	1	0	73.755	19	-2	1	6
		36.297	127	0	2	0	74.350	6	3	3	0
		*36.297	127	1	1	2	*74.350	6	4	0	2
		36.586	9	-2	1	2	74.937	2	-5	0	2
		38.205	1	0	2	1	*74.937	2	-3	0	6
		39.336	5	1	2	0	76.184	7	0	3	4
		39.759	120	2	1	1	*76.184	7	-4	1	5
		*39.759	120	0	1	3	*76.419	9	-2	3	4
		42.498	1	1	2	1	77.029	9	0	4	0
		42.855	1	-2	1	3	*77.029	9	2	2	4
		43.541	124	0	2	2	77.268	17	4	1	2
		*43.541	124	2	0	2	*77.268	17	0	1	6
		43.625	87	-1	2	2	77.761	16	-5	1	2
		45.112	37	3	0	0	*77.761	16	-4	2	4
		*45.112	37	-1	0	4	78.473	1	4	2	1
		46.482	1	1	1	3	78.985	4	1	4	0
		46.622	3	-2	2	1	*78.985	4	3	0	4
		46.786	2	-3	1	1	79.231	3	3	2	3
		47.511	55	2	2	0	*79.231	3	1	2	5
		*47.511	55	0	0	4	79.434	2	5	0	0
		47.833	172	-3	1	2	79.917	1	-5	0	4
		*47.833	172	-2	0	4	81.094	1	2	3	3
		48.659	45	1	2	2	*81.094	1	2	1	5
		48.887	150	-2	2	2	81.766	3	0	4	2
		*48.887	150	-1	1	4	*81.766	3	1	3	4
		50.345	1	-1	2	3	81.882	4	-1	4	2
		51.201	18	0	1	4	*81.882	4	1	0	6
		51.495	20	0	2	3	82.107	10	-1	2	6
		*51.495	20	-2	1	4	82.248	14	5	1	0
		53.862	2	3	1	1	*82.248	14	-3	3	4
		54.008	2	-2	2	3	82.727	3	-5	1	4
		54.616	22	1	0	4	*82.727	3	-4	0	6
		55.176	5	-3	0	4	83.965	2	-2	4	1
		57.082	21	0	3	1	84.619	20	2	4	0
		*57.082	21	2	1	3	*84.619	20	3	3	2
		57.921	57	1	3	0	85.541	4	-4	1	6
		*57.921	57	2	2	2	85.648	7	-2	4	2
		58.494	8	-4	0	2	*85.648	7	4	2	2
		*58.494	8	-3	1	4	86.217	8	-5	2	2
		59.214	3	3	2	0	*86.217	8	-3	2	6
		*59.214	3	-1	2	4	86.788	1	4	1	3
		60.334	3	1	3	1	*86.788	1	0	3	5
		60.640	1	-1	1	5	87.229	2	-5	2	1
		61.215	34	-1	3	2	*87.229	2	-2	1	7
		*61.215	34	0	2	4	87.644	3	0	4	3
		61.499	19	4	0	0	*87.644	3	4	3	0
		*61.499	19	-2	2	4	87.970	2	5	1	1
		61.686	10	-4	1	2	88.683	1	-5	1	5
		61.842	16	-4	1	1	89.656	1	-2	4	3
		*61.842	16	-2	1	5					
		63.620	13	3	2	1					
		*63.620	13	0	1	5					
		64.336	4	2	3	0					
		64.603	3	4	1	0					
		65.280	28	1	3	2					
		*65.280	28	2	0	4					
		65.469	16	-2	3	2					
		66.063	29	-4	0	4					
		66.684	1	-1	3	3					
		67.346	7	1	2	4					
		67.606	4	2	3	1					
		*67.606	4	0	3	3					
		67.841	1	-3	2	4					
		68.330	9	2	1	4					
		69.068	2	-4	1	4					
		69.825	8	4	1	1					
		*69.825	8	-1	2	5					
		70.373	8	3	2	2					
Lattice : Monoclinic S.G. : P21/c (14) a = 6.33400 b = 4.94800 c = 8.03300 a/b = 1.28011 c/b = 1.62348 beta = 107.90 Z = 4 Mol. weight = 100.09 Volume [CD] = 239.57 Dx = 2.775 I/lor = 2.09											
ICSD collection code: 000150 Remarks from ICSD/CSD: REM PRE 18 kbar. Temperature factor: ITF Additional pattern: See PDF 29-305. Data collection flag: Non ambient pressure.											
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=170(0.0039,45)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings									
Merrill, L., Bassett, W.A., Acta Crystallogr., Sec. B, volume 31, page 343 (1975) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)											

ตารางที่ จ-3 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Ca(OH)_2 ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-001-1079

Pattern : 00-001-1079		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Ca(OH) ₂ Calcium Hydroxide Portlandite		2θ 17.978 28.681 34.062 47.046 50.978 54.233 59.599 62.260 64.179 71.403 81.505 84.107 93.220 95.577 99.401 106.719 129.980	i 50 25 100 50 40 30 2 20 20 16 2 15 10 5 8 5 2	h 0 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 3 0 1 2 2	k 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 1 0 1	l 1 0 1 2 0 1 0 1 3 2 0 0 2 4 0 4 4 4
Lattice : Hexagonal S.G. : P-3m1 (164)		Mol. weight = 74.09 Volume [CD] = 53.88				
a = 3.56500 c = 4.89500	Z = 1	Dx = 2.284 Dm = 2.230				
Deleted and rejected by: Deleted by NBS card. Color: Colorless Optical data: A=1.547, B=1.574, Sign=- General comments: -H ₂ O at 525 C. Data collection flag: Ambient.						
Hanawalt. et al., Anal. Chem., volume 10, page 475 (1938)						
Radiation : MoK α Lambda : 0.70900 SS/FOM : F17= 2(0.2120,35)		Filter : Beta d-sp : Not given				

ตารางที่ ๑-4 แสดงค่า 2θ, intensity และ hkl ของ Ettringite ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003

JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-041-1451

Pattern : 00-041-1451		Radiation = 1.540598					Quality : High				
Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26H ₂ O		2θ	i	h	k	l	2θ	i	h	k	l
Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate Ettringite, syn		9.091	100	1	0	0	*77.926	2	6	3	0
		9.987	4	1	0	1	78.459	1	6	1	10
		12.283	1	1	0	2	80.353	1	6	3	4
		15.784	76	1	1	0	81.926	1	4	2	14
		17.832	12	1	1	2	*81.926	1	5	4	6
		18.243	6	2	0	0	83.395	1	6	3	6
		18.911	17	1	0	4	85.762	1	7	1	9
		20.050	1	2	0	2	86.235	1	4	2	15
		22.111	3	2	0	3	88.592	2	7	1	10
		22.944	31	1	1	4	*88.592	2	4	4	12
		24.212	4	2	1	0	88.796	1	6	4	3
		24.724	7	2	0	4	90.569	1	8	1	6
		25.614	23	2	1	2	*96.313	1	5	5	8
		27.284	5	2	1	3	*96.313	1	4	4	14
		27.507	21	3	0	0	96.937	1	8	2	5
		28.766	1	3	0	2	*96.937	1	7	3	7
		29.645	4	1	1	6					
		31.867	6	2	2	0					
		32.268	25	3	0	4					
		32.977	1	2	2	2					
		33.204	7	3	1	0					
		33.459	1	0	0	8					
		34.277	16	3	1	2					
		35.023	29	2	1	6					
		35.568	2	3	1	3					
		36.116	2	2	2	4					
		36.963	1	4	0	0					
		37.185	1	1	1	8					
		37.458	6	3	0	6					
		38.371	2	2	0	8					
		40.416	8	3	2	0					
		40.875	22	2	2	6					
		41.325	5	3	2	2					
		41.969	13	3	1	6					
		42.444	2	3	2	3					
		42.591	5	4	1	0					
		43.473	2	4	1	2					
		43.961	3	3	2	4					
		44.786	1	3	1	7					
		45.306	1	1	1	10					
		46.011	2	4	1	4					
		46.687	11	5	0	0					
		47.755	1	4	0	7					
		48.652	1	3	3	0					
		49.212	3	2	1	10					
		49.440	5	3	3	2					
		49.786	3	4	2	1					
		50.375	4	4	2	2					
		51.161	1	0	0	12					
		*51.161	1	3	1	9					
		51.721	4	3	3	4					
		52.391	2	5	1	0					
		53.112	2	5	1	2					
		53.717	2	5	0	6					
		54.688	3	3	1	10					
		55.223	5	4	1	8					
		55.296	5	5	1	4					
		56.783	8	6	0	0					
		57.637	2	4	3	0					
		58.236	3	4	1	9					
		58.601	3	4	2	7					
		59.179	1	2	0	13					
		60.328	1	3	3	8					
		61.481	2	4	1	10					
		62.074	1	5	2	4					
		63.736	1	2	0	14					
		65.340	1	5	2	6					
		66.123	1	1	0	15					
		*66.123	1	2	1	14					
		67.417	1	5	3	0					
		69.173	1	4	4	4					
		70.238	1	6	0	9					
		71.779	1	5	0	12					
		72.224	2	6	2	4					
		73.329	1	2	0	1					
		74.065	2	4	2	12					
		*74.065	2	7	1	2					
		75.304	1	3	2	14					
		75.941	2	7	1	4					
		77.926	2	5	4	3					
Lattice : Hexagonal S.G. : P31c (159) a = 11.22400 c = 21.40800 Z = 2		Mol. weight = 1255.10 Volume [CD] = 2335.62 Dx = 1.785 Dm = 1.770									
Sample preparation: Sample synthesized from CaO + Al ₂ (SO ₄) ₃ in solution at 18 C. Color: Colorless Additional pattern: To replace 2-59, 9-414, 13-350, 31-251 and 37-1476. Temperature of data collection: Pattern taken at 15 C. Optical data: A=1.464, B=1.458, Sign=- General comments: Preferred orientation enhances hk0 reflections. Additional pattern: See ICSD 16045 (PDF 72-646). Data collection flag: Ambient.											
̄, Y., China Building Materials Academy, Beijing, China., Private Communication (1989) CAS Number: 12252-15-2											
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=226(0.0025,53)		Filter : Beta d-sp : Diffractometer									

ตารางที่ ๑-5 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ CSH ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-003-0611

Pattern : 00-003-0611		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
CaO·SiO ₂ ·H ₂ O		2th	i	h	k	l
Calcium Silicate Hydrate		14.438	20			
		19.624	40			
		20.935	40			
		23.391	20			
		24.851	40			
		27.769	60			
		29.655	100			
		32.173	60			
		35.892	60			
		40.416	80			
		42.612	20			
		45.068	40			
		48.104	80			
		48.652	20			
		50.375	20			
		51.596	60			
		56.403	20			
		57.559	40			
Lattice : Not assigned		Mol. weight = 134.18				
S.G. : (0)						
<p>Deleted and rejected by: Delete: same as 3-606. General comments: Synthetic. Color: Colorless Optical data: B=1.603 Data collection flag: Ambient.</p>						
McMurdie, H., Flint., J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.), volume 31, page 227 (1943)						
Radiation : CuK α		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54100		d-sp : Not given				

ตารางที่ ๑-6 แสดงค่า 2 θ , intensity และ hkl ของ Al(OH)₃ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003

JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-070-2038

Pattern : 01-070-2038		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Al(OH) ₃		13.144	1	-1	0	1	64.538	43	-4	1	5
		14.227	2	1	0	1	*64.538	43	6	0	0
		18.267	999	0	0	2	65.019	2	-2	3	3
		20.258	347	1	1	0	65.019	2	4	2	3
		20.502	173	2	0	0	65.164	2	5	2	0
		21.909	1	-1	1	1	*65.164	2	-5	2	1
		22.585	1	1	1	1	65.465	1	-2	2	5
		26.486	56	-2	0	2	65.722	2	2	1	6
		26.846	98	1	1	2	*65.722	2	2	1	6
		27.980	72	1	1	2	66.027	53	-6	0	2
		28.679	33	-1	0	3	*66.027	53	-3	3	2
		28.679	33	2	0	2	66.345	6	-5	1	4
		29.124	3	2	1	0	66.537	39	-3	1	8
		30.223	1	1	0	3	66.693	20	2	3	3
		31.615	2	-3	0	1	67.425	2	0	3	4
		31.877	3	-2	1	2	*67.425	2	6	1	0
		32.797	1	0	1	3	67.609	14	3	3	2
		33.052	5	3	0	3	67.831	9	-1	3	4
		33.768	7	-1	1	3	68.754	24	0	2	6
		33.768	7	2	1	2	68.934	18	-1	2	6
		35.110	1	1	1	2	*68.934	18	1	3	4
		36.322	1	0	2	0	69.349	6	-6	0	2
		36.762	2	3	1	0	69.511	3	-3	3	3
		36.335	65	-3	1	1	69.711	5	5	2	2
		36.552	111	0	2	1	*69.711	5	-4	0	6
		37.020	26	0	0	4	70.197	1	-2	3	4
		37.613	163	3	1	1	70.583	14	1	2	6
		37.752	97	-2	1	3	*70.583	14	4	3	0
		38.257	8	1	2	1	70.805	6	-4	3	1
		38.242	1	-1	2	2	70.992	9	-2	2	6
		40.047	61	0	2	2	*70.992	9	4	2	4
		40.163	39	-3	0	3	71.478	21	3	1	6
		40.163	39	2	1	3	71.833	4	-3	1	4
		41.046	47	4	0	0	*71.833	4	4	3	1
		41.152	9	-2	0	4	72.547	6	-4	3	2
		*41.152	9	0	1	4	*72.547	6	-5	1	5
		41.613	78	3	1	2	73.315	5	-3	0	7
		41.701	47	4	0	0	73.620	1	-6	0	4
		42.651	1	2	2	1	74.205	4	5	2	3
		43.313	8	1	1	4	*74.205	4	2	2	6
		43.617	2	3	0	3	74.423	2	-3	3	2
		44.094	122	-3	1	4	74.684	3	4	3	2
		44.177	71	2	0	4	*74.684	3	-5	2	4
		44.429	7	-4	0	2	74.924	2	-3	0	6
		44.674	9	-2	2	2	75.480	2	0	4	1
		45.013	8	-2	1	1	75.651	5	1	4	0
		45.370	89	0	2	3	75.769	5	-4	3	3
		45.524	50	4	1	0	*75.769	5	6	2	0
		45.817	3	-4	1	1	75.887	3	1	3	5
		46.114	16	-1	2	3	76.049	10	2	1	7
		46.114	16	2	2	2	*76.049	10	-3	1	7
		47.317	67	4	0	2	76.264	7	-1	4	1
		47.317	67	3	1	3	76.527	2	5	0	5
		47.842	4	2	1	4	*76.527	2	1	4	1
		48.125	1	-4	1	2	76.711	1	6	1	3
		*48.125	1	-3	2	1	*76.711	1	-2	3	5
		48.851	1	1	0	5	77.158	6	-6	2	2
		49.150	1	3	2	1	77.302	6	6	2	1
		49.282	1	-2	2	3	77.592	3	3	3	4
		50.453	106	-3	1	4	77.687	4	0	4	2
		*50.453	106	-3	2	2	78.445	8	2	4	0
		50.627	58	-1	1	5	78.545	11	0	2	7
		50.779	6	4	1	2	*78.545	11	-1	2	7
		52.096	97	0	2	4	78.709	6	7	0	1
		*52.096	97	-4	1	3	78.831	15	0	0	8
		52.266	53	1	1	5	*78.831	15	1	4	2
		52.595	10	-1	1	5	79.053	11	5	3	0
		53.271	1	-2	1	5	79.331	3	2	3	5
		53.874	10	1	2	4	79.441	1	2	4	1
		54.335	92	3	1	4	79.745	5	7	1	0
		54.491	60	-4	0	4	80.056	9	-6	2	3
		*54.491	60	-3	2	3	*80.056	9	-5	1	6
		55.327	22	-2	2	4	80.293	13	6	2	2
		55.768	9	4	2	0	80.437	6	-2	0	9
		55.971	8	4	1	3	*80.437	6	5	3	1
		*55.971	8	-1	3	1	80.684	6	-5	3	2
		56.077	11	-4	2	1	*80.684	6	-5	2	5
		*56.077	11	5	1	0	80.854	8	-7	1	2
		56.280	6	1	3	5	*80.854	8	-2	4	2
		56.406	1	2	1	5	81.388	6	7	1	1
		57.248	3	4	2	1	*81.388	6	-1	1	8
		57.785	19	2	2	4	81.536	9	3	1	7
		57.991	20	-5	2	2	*81.536	9	-4	1	7
		*57.991	20	-4	2	2	81.887	5	-1	4	3
		58.396	7	-5	0	3	*81.887	5	2	4	2
		*58.396	7	-1	3	2	82.183	2	-6	3	5
		58.503	17	2	3	0	82.539	2	-1	3	6
		58.996	5	1	3	2	82.662	3	1	4	3
		*58.996	5	-2	3	1	*82.662	3	6	1	4
		59.384	9	4	0	4					
		*59.384	9	3	0	5					
		59.937	1	0	2	5					
		*59.937	1	0	1	6					
		60.131	4	-3	2	4					
		*60.131	4	-1	1	6					
		60.379	5	4	2	2					
		60.866	5	5	1	2					
		61.249	7	-2	3	2					
		61.430	7	-5	1	1					
		61.576	3	-4	2	2					
		61.710	2	1	2	6					
		61.889	4	1	1	6					
		62.411	11	2	3	2					
		*62.411	11	3	1	5					
		62.616	6	2	2	6					
		62.853	2	5	0	3					
		*62.853	2	2	0	3					
		63.265	2	1	3	3					
		63.687	71	3	3	0					
Radiation : CuK α		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=631(0.0012,39)											

ตารางที่ ๑-7 แสดงค่า 2θ, intensity และ hkl ของ CaSO₄ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-074-2421

Pattern : 01-074-2421		Radiation = 1.540598		Quality : Alternate		
Ca(SO ₄)		2θh	i	h	k	l
Calcium Sulfate Anhydrite		19.092	2	1	0	1
		22.980	51	1	1	1
		25.502	999	0	2	0
		*25.502	999	0	0	2
		28.634	25	2	0	0
		31.423	352	2	1	0
		32.052	34	1	2	1
		36.404	70	0	2	2
		38.741	194	2	2	0
		*38.741	194	2	0	2
		40.920	199	2	1	2
		41.447	61	1	0	3
		43.467	63	1	3	1
		*43.467	63	1	1	3
		45.541	44	3	0	1
		46.956	32	2	2	2
		47.465	2	3	1	1
		48.816	138	2	3	0
		49.297	30	1	2	3
		52.391	60	0	4	0
		52.471	68	0	0	4
		52.918	4	3	2	1
		55.891	124	2	3	2
		56.271	5	1	4	1
		57.970	24	1	3	3
		59.221	26	0	4	2
		*59.221	26	0	2	4
		60.866	27	2	0	4
		*60.866	27	4	1	0
		61.275	10	3	3	1
		*61.275	10	3	1	3
		62.452	44	2	1	4
		65.602	23	4	2	0
		*65.602	23	4	0	2
		65.950	8	3	2	3
		67.125	23	2	2	4
		*67.125	23	4	1	2
		68.909	6	1	4	3
		70.363	1	1	5	1
		70.465	1	1	1	5
		71.600	39	4	2	2
		73.048	12	4	3	0
		74.476	45	2	5	0
		*74.476	45	2	3	4
		77.324	8	0	4	4
		77.808	1	5	0	1
		78.822	31	4	3	2
		79.232	2	5	1	1
		80.151	16	2	5	2
		81.981	3	1	5	3
		*81.981	3	1	3	5
		82.928	18	0	6	0
		83.073	24	0	0	6
		*83.073	24	4	0	4
		83.382	14	3	4	3
		84.515	8	4	1	4
		84.753	4	3	5	1
		86.094	1	1	6	1
		88.544	17	0	6	2
		88.661	40	4	4	2
		*88.661	40	4	2	4
		89.953	1	2	6	0
Lattice : Base-centered orthorhombic S.G. : Bbmm (63) a = 6.23000 b = 6.98000 c = 6.97000 a/b = 0.89255 c/b = 0.99857		Mol. weight = 136.14 Volume [CD] = 303.09 Dx = 2.983 Z = 4 I/cor = 1.73				
ICSD collection code: 028546 Remarks from ICSD/CSD: REM M PDF 37-1496. Test from ICSD: At least one TF missing. Temperature factor: ITF Additional pattern: See PDF 72-916. Data collection flag: Ambient.						
Hoehne, E., Kristallografiya, volume 7, page 690 (1962) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30= 90(0.0078,43)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ตารางที่ ๑-8 แสดงค่า 2θ, intensity และ hkl ของ CaSO₄·2H₂O ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS-International Center for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-076-1746

Pattern : 01-076-1746		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
CaSO ₄ (H ₂ O) ₂		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Calcium Sulfate Hydrate Gypsum		10.348	14	1	1	0	*55.243	5	4	4	2
		11.673	999	0	2	0	*55.243	5	1	9	0
		14.267	61	0	0	1	55.564	1	3	1	3
		16.532	1	-1	1	1	*55.564	1	1	1	3
		17.134	133	2	0	0	55.080	7	-3	7	2
		18.472	2	0	2	1	56.878	5	-6	0	2
		18.715	9	1	1	1	*56.878	5	0	8	2
		19.546	8	1	3	0	57.561	1	5	1	5
		20.762	93	2	2	2	*57.561	1	0	6	3
		23.469	10	-1	3	1	57.758	1	5	5	1
		23.469	10	0	4	0	*57.758	1	1	9	1
		23.704	1	-2	2	1	57.999	1	-4	5	2
		24.043	4	2	0	1	*57.999	3	-5	5	2
		25.074	11	1	3	1	58.151	3	-5	1	3
		26.495	3	3	1	0	58.282	6	-5	1	3
		26.803	1	2	2	1	*58.282	6	-6	2	2
		27.572	47	0	4	1	58.370	7	3	3	3
		28.760	152	0	0	2	*58.370	4	-6	4	1
		29.204	27	2	4	0	58.560	4	-6	4	0
		30.723	5	1	5	0	58.613	3	6	4	0
		31.134	119	0	2	1	*58.613	5	-2	0	4
		31.204	99	-2	0	2	58.565	8	0	0	4
		31.394	16	3	3	0	60.328	3	5	3	2
		31.394	16	3	3	0	60.556	4	4	6	0
		31.915	4	1	1	2	60.737	12	0	7	2
		32.132	3	2	3	1	60.930	13	0	2	4
		32.852	2	-3	3	1	*60.930	13	-5	3	3
		33.421	28	-2	2	2	61.066	6	-4	8	1
		33.421	28	-1	5	2	*61.066	6	0	10	0
		33.845	1	-1	3	2	61.227	10	3	6	4
		*33.845	1	2	4	1	61.427	7	2	8	2
		34.667	36	1	5	1	61.621	5	4	0	3
		*34.667	36	4	0	0	*61.621	5	-1	7	3
		35.442	33	-4	0	1	61.838	2	-1	3	4
		35.525	20	0	6	0	62.013	4	5	7	0
		35.984	19	2	0	2	62.171	3	1	1	4
		36.150	12	1	3	2	*62.171	3	4	6	4
		36.272	10	1	1	2	62.374	3	-6	4	2
		36.345	13	3	3	1	62.568	2	-7	1	1
		36.699	19	4	2	0	62.724	5	-1	9	2
		37.437	21	-4	2	1	62.934	3	4	2	3
		*37.437	21	0	4	2	63.120	3	0	10	1
		37.954	16	2	2	2	*63.120	3	7	1	0
		38.461	4	0	6	1	63.806	1	3	5	3
		39.412	11	-2	4	2	*63.806	1	1	7	3
		39.567	3	5	4	2	64.048	1	2	10	0
		39.692	31	2	6	0	*64.048	1	4	8	1
		39.775	30	4	0	1	64.201	2	1	9	2
		40.106	13	-3	3	2	64.330	1	3	9	1
		40.769	3	-3	6	1	64.572	3	-3	3	4
		41.394	5	-2	6	6	64.795	1	3	3	4
		41.593	9	4	2	1	*64.795	3	-2	4	4
		*41.593	9	-1	5	2	64.823	3	0	4	4
		41.819	15	-4	0	2	65.082	4	-4	0	4
		42.290	1	4	4	0	*65.082	2	-3	7	3
		42.646	7	1	7	0	65.279	4	-2	10	1
		42.947	2	-4	4	1	*65.279	2	-6	6	1
		43.410	6	2	6	2	65.416	4	2	0	0
		*43.410	6	2	4	2	65.517	6	-4	8	6
		43.566	15	1	5	2	65.650	4	-5	5	2
		*43.566	15	-4	2	2	65.822	4	-7	1	1
		43.719	10	3	5	0	*65.822	4	8	0	2
		*43.719	10	0	0	3	66.197	5	-5	7	2
		44.156	2	5	1	0	66.382	4	-4	2	4
		44.320	1	-5	1	1	66.713	3	-2	10	1
		44.548	1	-2	0	3	*66.713	3	2	2	4
		44.726	4	-1	7	1	66.884	6	-3	9	2
		45.432	1	0	2	3	*66.884	6	0	8	3
		45.657	1	1	7	1	67.091	3	-1	5	4
		45.922	1	3	3	2	67.213	4	6	2	2
		46.330	2	0	6	2	67.557	1	-2	8	3
		46.459	2	1	1	3	68.458	1	-7	3	2
		46.699	1	4	4	1	68.698	2	1	11	0
		46.990	10	-3	5	2	68.882	3	-6	6	2
		*46.990	10	-1	3	3	*68.882	3	0	10	2
		47.462	5	5	3	0	69.307	1	5	1	3
		47.617	3	-5	3	1	69.717	2	-3	5	4
		47.995	11	-2	6	2	69.932	2	-6	4	3
		*47.995	11	0	8	0	*69.932	2	1	5	4
		48.507	1	-4	4	2	70.161	1	-5	1	4
		48.871	1	5	1	1	70.330	1	-7	5	1
		49.234	7	4	0	2	70.531	1	2	4	4
		49.325	4	-5	1	1	*70.531	1	3	1	4
		49.700	18	1	3	3	71.133	7	3	9	2
		*49.700	18	3	7	0	*71.133	7	-2	6	4
		49.951	3	2	0	3	71.312	5	0	6	3
		50.230	3	0	4	3	71.787	1	2	8	3
		50.338	4	0	8	1	*71.787	1	5	3	3
		50.481	2	4	6	0	71.950	2	-1	9	3
		50.781	5	4	2	2					
		50.954	3	-2	4	3					
		51.055	1	-4	6	1					
		*51.055	1	-3	3	3					
		51.339	9	2	8	0					
		51.461	12	2	6	2					
		*51.461	12	2	2	3					
		52.111	6	-4	0	3					
		52.200	6	3	5	2					
		52.381	4	-5	3	2					
		52.742	3	-2	8	1					
		53.090	7	1	7	2					
		*53.090	7	6	0	0					
		53.227	4	3	7	1					
		53.605	7	-4	2	1					
		*53.605	7	5	5	0					
		53.747	4	-5	5	1					
		54.385	3	4	6	1					
		*54.385	3	2	8	3					
		54.558	7	6	2	0					

Lattice : Base-centered monoclinic
S.G. : C2/m (12)
a = 10.47000
b = 15.15000
c = 6.28000
a/b = 0.69109
c/b = 0.41452

Mol. weight = 172.17
Volume [CD] = 983.95
Dx = 1.162
l/lcor = 5.05

beta = 98.97
Z = 4

ICSD collection code: 036186
Remarks from ICSD/CSD: ATOM H 1 +1 16.00 Atoms not located in unit cell.
Test from ICSD: At least one TF missing.
Test from ICSD: No R value given.
Additional pattern: See PDF 21-816.
Remarks from ICSD/CSD: For correct structure cp. 2058/2059.
Test from ICSD: Calc. density unusual but tolerable.
Data collection flag: Ambient.

Onorato, E., Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 71, page 277 (1929)
 Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)

Radiation : CuKα1
Lambda : 1.54060
SS/FOM : F30=379(0.0021,38)

Filter : Not specified
d-sp : Calculated spacings

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรวิฑูรย์ ตะวงษ์ เกิดวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสาขาวิชาเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2551 และสำเร็จการศึกษาในปี 2553

ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษานั้น ได้มีโอกาสไปนำเสนอผลงานทางวิชาการในรูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมทางวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2010) ระหว่างวันที่ 21-23 มกราคม พ.ศ. 2553 จัดโดยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และนำเสนอผลงานทางวิชาการในรูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมทางวิชาการ The 1st national Research Symposium on Petroleum, and 16th PPC Symposium on petroleum, Petrochemicals, and Polymers เมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2553